



HAL
open science

Véhicule électrique et forme urbaine : une évaluation prospective

Manon Solignac

► **To cite this version:**

Manon Solignac. Véhicule électrique et forme urbaine : une évaluation prospective. Economies et finances. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1010 . tel-01882700

HAL Id: tel-01882700

<https://pastel.hal.science/tel-01882700>

Submitted on 27 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ÉCOLE DOCTORALE "VILLE, TRANSPORTS ET TERRITOIRES"

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

Sciences économiques

MANON SOLIGNAC

Véhicule électrique et forme urbaine : une évaluation prospective

Thèse dirigée par Franck LECOCQ et Céline GUIVARCH
Soutenue le 17 Janvier 2018

Jury

M. Charles RAUX Ingénieur de recherche, Directeur du LAET

M. Edi ASSOUMOU Chargé de recherche, ENSMP

Mme. Catherine BAUMONT Professeure des Universités, Université de Bourgogne

M. Nicolas COULOMBEL Ingénieur en chef des Ponts Eaux et Forêts, LVMT

Rapporteur

Rapporteur

Présidente

Examineur

Remerciements

00h05 39°N15'18" 5°E27'26"

Vent : 8nds au 250°

Cap au 103° sous spi asymétrique à 4.8nds

Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans l'implication de nombreux protagonistes que je tiens à remercier ici. Dans une expérience aussi prenante que celle de l'élaboration d'une thèse, il est difficile de dresser la liste exhaustive des personnes qui ont participé à l'achèvement de ce projet, mais je vais tenter de me plier à cet exercice avec application.

Tout d'abord, je remercie Franck Lecocq, mon directeur de thèse, pour le suivi de mon travail et l'aide précieuse qu'il a pu m'apporter pour le faire progresser au cours de ces années.

Je remercie Céline Guivarch pour sa bienveillance, pour toutes les corrections qu'elle a pu apporter et pour le temps qu'elle a passé à m'orienter dans mes recherches, tant il est vrai qu'il est facile de se perdre dans cette aventure.

Je remercie l'Institut de la Mobilité Durable qui a financé ces travaux et mis en place des séminaires réguliers, propices aux échanges entre chercheurs et partenaires privés sur le sujet des véhicules électriques.

Je remercie aussi Vincent Viguié et Paolo Avner pour leur très agréable collaboration et pour m'avoir confié le modèle de ville que j'ai utilisé ici et sans lequel je n'aurais pas pu obtenir ces résultats.

Je remercie Adrien, qui m'a ouvert les portes du CIRED et introduit au travail de recherche.

Cette expérience a aussi été riche en rencontres heureuses au sein du laboratoire du CIRED et ces personnes ont su égayer mes journées de travail et m'apporter leur soutien quand il était bienvenu. Leur amitié dépasse de loin le cadre professionnel et je tiens donc à les remercier individuellement.

Au CIRED, j'ai rencontré Meriem et elle m'a offert son amitié de façon si simple que je ne pense pas avoir mesuré immédiatement à quel point elle me serait précieuse. Merci Meriem pour ta joie exubérante (c'est un compliment) et ton soutien indéfectible.

J'ai rencontré William et Gaëlle et je ne compte plus les heures que nous avons partagées dans leur bureau. Merci William pour tous les plans sur la comète, passés, futurs et en cours d'élaboration. Merci aussi pour les 40kg de pâtes que tu as bien voulu m'échanger chaque midi contre tes préparations bien plus sophistiquées. Merci Gaëlle pour les longues séances de confidences que nous avons partagées. Merci de m'avoir écouté me plaindre, désolée, c'est tombé sur toi.

Je remercie Yael (ou Tata Yaya) qui veille sur nous telle une maman ourse sur ses oursons.

Je remercie tous ceux qui ont partagé mes jeux, mes soirées, mes vacances et tant d'autres choses. Merci Elsa pour avoir vainement essayé de me sensibiliser aux bienfaits du yoga à l'heure du goûter. Merci Manu pour t'être souvent soucie de l'avancement de ma thèse et avoir toujours été de bon conseil. Merci Arancha, Catherine, Christophe, Henri, Laurent...

Je tiens aussi à remercier Aurélie, Philippe et Julie qui ont partagé mon bureau et par conséquent, mes moments d'agitation excessive ainsi que mes coups de mou.

L'investissement que représente la thèse n'aurait pas pu être réalisé sans le concours d'une multitude d'autres personnes en dehors du laboratoire qui ont suivi de près ou de loin l'avancement de mon travail. En premier lieu ici, je remercie ma famille qui s'est toujours inquiétée de ma réussite. Je te remercie JB, pour tes encouragements, pour tes relectures (nombreuses), pour m'avoir appris à écrire un peu mieux et pour ton soutien quotidien. Merci encore pour ton aide dans la dernière ligne droite. Je suis sûre que tu connais ma thèse par coeur.

Je remercie aussi les membres de l'équipe de régates d'Atao avec qui j'ai pu m'échapper un week-end sur deux pendant toutes ces années. Merci Thomas pour tes aventures contées uniquement sous spi. Merci Matthieu, champion hors catégorie des jeux de mots. Merci Benoit, capable de faire dérailler un train pour les besoins de la cause.

Merci aux amis qui se sont souciés de mon travail en me posant cette éternelle question : " Ca avance la thèse ? ". Je vous promets que, même si cette question n'a pas toujours parue être bien reçue, l'intérêt qu'elle témoigne a toujours été apprécié.

Merci à Tartuffe et au chat noir qui ont surveillé les derniers mois de la rédaction de cette thèse en ronronnant.

Merci Atao, merci Mélusine.

03h54 39°N20'08" 5°E40'38"

Vent : 7nds au 253°

Cap au 103° sous spi asymétrique à 4.3nds

Je termine mon quart.

Résumé

Cette thèse s'intéresse à l'évaluation du potentiel et du coût du véhicule électrique comme solution pour réduire les émissions de CO₂ dues au transport de passagers en ville. Elle montre comment intégrer les habitudes de déplacement des usagers dans les méthodologies de quantification modifie ces évaluations.

Les analyses portant sur le véhicule électrique calculent généralement un potentiel de réduction d'émissions et un coût sans distinguer les spécificités locales des territoires où ce véhicule pourra être mis en place et de l'utilisation qui en découle. Elles ne tiennent pas compte non plus des autres politiques existantes sur ce territoire, notamment de celles jouant sur la structure de la mobilité, à savoir son volume total et son partage modal. Ainsi, les différentes solutions de réduction d'émission de CO₂, technologiques d'un côté et portant sur la structure de la mobilité de l'autre, sont le plus souvent discutées de manière indépendante, et les possibles rétroactions de l'une vers l'autre sont peu analysées.

Cette thèse vise donc à considérer conjointement l'introduction d'une solution technologique telle que le véhicule électrique et les structures urbaines dans lesquelles elle se déploie. Pour cela, nous développons un modèle de choix de technologies de véhicules des ménages, et l'intégrons à un modèle d'économie urbaine. Nous nous intéressons dans un premier temps, aux caractéristiques spatiales de la ville et donc à l'usage qui est fait de ce véhicule ; puis, dans un deuxième temps, à la mise en oeuvre simultanée d'une solution jouant sur la structure de la mobilité pour réduire les émissions : la ceinture verte. Ces deux analyses nous permettent de mettre en évidence, et de quantifier, l'interdépendance d'une action s'appuyant sur la technologie et d'une autre s'appuyant sur la structure de la mobilité. Enfin, dans un troisième temps, nous introduisons l'hétérogénéité des usages ainsi que l'incertitude sur les prix futurs de l'énergie et les coûts futurs des batteries dans un modèle de calcul de la valeur d'option du déploiement du véhicule électrique. Nous montrons que ces deux éléments conduisent à réviser l'évaluation de la valeur d'option à la hausse.

Mots clés : véhicule électrique, forme urbaine, économie urbaine, émissions CO₂, interactions des politiques, valeur d'option

Abstract

This thesis brings precisions on the measure of the emissions reduction potential in cities and the cost of electric vehicle by taking into account users driving patterns.

Studies on electric vehicles or other solutions belonging to the "technological lever" compute emissions reduction potential and cost without discerning the local specificities of the areas where it would be used and the use that would be done of these vehicles.

These studies don't take into account the other policies implemented in the area, including the ones that operate on a different lever such as the "mobility structure lever" : volume of activity and modal shares. Policies for reducing CO₂ emissions are often discussed independently and ignore the possible retroactions.

To improve the evaluation of the potential of the electric vehicle, it seems essential to take into account the environment in which it would be developed. We use a urban economics model to first look at the spatial features of the city, and so at the use of this vehicle. Then we compute the impacts of the simultaneous introduction of the electric vehicle and a solution belonging to the "mobility structure lever" : the greenbelt. These two last points allow us to highlight the interdependency of the two action levers : technology and mobility structure. Then we take into account the use of the car by the households and the uncertainty around electric vehicle introduction, to improve the evaluation of the cost of this solution.

Keywords : electric vehicle, urban form, urban economics, CO₂ emissions, policy interactions, option value

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	III
Abstract	V
Introduction	1
1 Mobilité des passagers en ville et émissions de CO₂	9
1.1 Etat des lieux des émissions de CO ₂ dues à la mobilité privée en ville	10
1.2 Décomposition ASIF des émissions	11
1.3 Le levier structure de la mobilité	17
1.3.1 Structure de la mobilité et émissions	18
1.3.2 Forme urbaine et émissions	20
1.3.3 Lien entre structure des transports et forme urbaine pour expliquer les émissions	24
1.4 Le levier technologique	30
1.4.1 Technologies des véhicules privés peu émetteurs	30
1.4.2 Histoire du véhicule électrique	33
1.4.3 La technologie actuelle	35
1.4.4 Scénarios sur les conditions de déploiement du véhicule électrique	39
1.4.5 Exemples de projets mis en place sur le levier technologique	43
1.5 Conclusion	47
2 Modélisation du choix de véhicule par les ménages	50
2.1 Modélisation adoptée dans cette thèse	51
2.1.1 Trois types de véhicules	51
2.1.2 Déterminants du choix du type de motorisation	51
2.1.3 Modèle de choix uniquement basé sur le coût	52

2.1.4	Modèle de choix discret avec logit multinomial	53
2.2	Discussion autour des hypothèses de modélisation	58
2.2.1	Caractéristiques du véhicule	59
2.2.2	Caractéristiques des ménages	61
2.2.3	Résumé	64
2.2.4	Modèles de perspectives et choix technologiques	65
2.2.5	Modèles "energy-economy"	66
2.2.6	Modèles sectoriels	67
2.2.7	Modèles à l'échelle locale	67
2.3	Conclusion	68
3	Modélisation de la ville et des transports	70
3.1	Les modèles de forme urbaine	71
3.1.1	La modélisation de la ville en économie urbaine	71
3.1.2	Les modèles "Land Use Transport Interaction" (LUTI)	73
3.2	NEDUM-2D	75
3.2.1	Les équations du modèle	77
3.2.2	Hypothèses et paramètres	78
3.3	Le module de transports intégré à NEDUM-2D	80
3.3.1	Description du module	80
3.3.2	Premières analyses	83
3.3.3	Limites	86
4	Potentiel de réduction des émissions du véhicule électrique et formes urbaines	88
4.1	Le véhicule électrique en ville	88
4.2	Méthode : étude de trois villes stylisées et d'une ville existante	90
4.3	Résultats : le véhicule électrique évite plus d'émissions dans les grandes villes étalées et augmente l'étalement urbain	94
4.4	Discussion : effet de la taille de la population et de la présence de transports en commun, répartition des efforts de développement sur les territoires	100
4.5	Conclusion	109
5	Interactions entre introduction du véhicule électrique et politiques de restriction à l'étalement urbain	112
5.1	Méthode : mise en oeuvre simultanée d'une politique de subvention au véhicule électrique et d'une restriction à l'étalement urbain	113
5.2	Résultats : le soutien au véhicule électrique peut réduire plus d'émissions seul qu'en présence d'une politique de restriction à l'étalement urbain	115

5.3	Discussion : tonnes de CO ₂ évitées par véhicule, coût d'abattement, études de sensibilité	122
5.4	Conclusion	131
6	Évaluation d'une valeur d'option associée à la disponibilité du véhicule électrique	134
6.1	La disponibilité du véhicule électrique comme une option pour la société	135
6.2	Méthode : prise en compte des incertitudes et de l'hétérogénéité .	139
6.3	Résultats : valeurs d'option en France	143
6.4	Discussion : études de sensibilité, coût et mise en oeuvre du pré-lèvement	145
6.5	Conclusion	148
	Conclusion	151
	References	156
	Annexes	173
	Annexe 1	175
	Annexe 2	193
	Annexe 3	209

Table des figures

1.1	Evolution des pkm (pkt en anglais) par personne pour différents mode de transport (LDV = véhicule privé) entre 1900 et 2010 aux États-Unis. (Source : A.Schafer, 2015)	12
1.2	Évolution des parts modales dans les pkm (pkt en anglais) dans le transport de passager entre 1900 et 2010 aux États-Unis (LDV = véhicule privé). (Source : A.Schafer, 2015)	13
1.3	Taux de motorisation selon les régions (source : IEA(2009))	14
1.4	Standards d'émissions historiques et futurs (source :IPCC et al,2014b)	16
1.5	Densité urbaine, utilisation du véhicule privé (vkm) et efficacité énergétique des transports en commun (source : Newman et Kenworthy, 1989)	20
1.6	Densités moyennes de 48 villes dans le monde (source : A.Bertaud, 2002a)	21
1.7	Consommation d'énergie des transports et densité (source : Newman et Kenworthy 1989)	23
1.8	Aire urbaine et réseau de transport de Barcelone et Atlanta (source : A.Bertaud, 2003)	27
1.9	Évolution des émissions de CO2 à l'horizon 2030 pour différentes technologies et leur coût pour la société (Source : IPCC et al, 2014b)	32
1.10	Immatriculation des voitures électriques en France depuis 2011 (Source : automobile-propre.com)	33
1.11	Part de marché des différentes motorisations en France au premier trimestre 2014 et 2015 (Source : CCFA, 2014)	36
1.12	Comparaison des émissions au cours du cycle de vie de quatre technologies de véhicules pour différents scénarios de production d'électricité. (Source : Granovskii et Rosen, 2005)	38
1.13	Comparaison des émissions lors du cycle de vie du véhicule électrique et thermique (Source : ADEME, 2012)	40
1.14	Objectifs de ventes (en haut) des gouvernement à travers le monde et stocks de véhicule électrique induit (en bas) (Source : IEA, 2013)	41

1.15	Prévisions de prix du kWh des batteries pour le véhicule électrique (Source :McKinsey)	42
1.16	Dépenses engagées entre 2008 et 2012 pour le développement du véhicule électrique dans le monde (Source : AIE,2013)	43
1.17	Evolution des émissions moyennes dans plusieurs pays d'Europe. (Source : ICCT, 2013)	45
2.1	Part du véhicule diesel et moyenne des kilomètres parcourus par an en France (Données : ENTD)	63
2.2	Distribution des véhicules à essence et diesel et moyenne des kilomètres parcourus par an en Ile de France	64
3.1	Variables d'entrée et de sortie du modèle NEDUM-2D (Source : Notice NEDUM-2D)	76
3.2	Emprise au sol de l'aire urbaine de Paris constatée (en noir) et simulée avec NEDUM-2D (en vert) (Source : Notice NEDUM-2D)	77
3.3	Données et paramètres calibrés dans NEDUM-2D (Source Viguié (2012))	79
3.4	Schéma du coût du transport en fonction de la distance au centre. Chaque couleur correspond à une pente différente.	81
3.5	Schéma d'intégration du module de transport au modèle d'économie urbaine standard.	82
3.6	Couronne d'utilisation du VE en 2050	85
4.1	Profil de densité de trois villes fictives	92
4.2	Variations de densité induites par la disponibilité du véhicule électrique dans trois villes fictives.	95
4.3	Localisation potentielle des utilisateurs du véhicule électrique et impact du véhicule électrique sur la densité en Ile de France en 2050	98
4.4	Variations des émissions liées à la disponibilité du véhicule électrique pour différents niveaux de population	101
4.5	Répartition des bornes de recharge répondant à l'utilisation du véhicule électrique dans chaque centre d'emploi	104
4.6	Nombre de véhicules électriques par lieu d'habitation	105
4.7	Localisation des bornes de recharge en Ile de France. En moyenne, chaque borne est équipée de 7 prises.	106
4.8	Revenus médians en Ile de France en 2010 (source : INSEE, 2013)	107
5.1	Positions relatives de la ceinture verte et des zones d'utilisation du véhicule électrique	116
5.2	Impact de la ceinture verte sur les émissions de CO ₂ en fonction du prix du véhicule électrique	117

5.3	Parts de marché du véhicule électrique parmi les voitures en fonction de son prix	119
5.4	Variation des émissions de CO ₂ induite par l'association des deux politiques par rapport au cas où aucune politique n'est mise en oeuvre et somme des variations induites par chacune des politiques mise en oeuvre seule.	122
5.5	Tonnes de CO ₂ évitées par véhicule électrique utilisé en fonction de son prix, pour trois villes monocentriques circulaires	123
5.6	Tonnes de CO ₂ évitées par véhicule électrique utilisé en fonction de son prix, en présence d'une ceinture verte, pour trois villes monocentriques circulaires	124
5.7	Impact de la ceinture verte sur les émission de CO ₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un logit faible	127
5.8	Impact de la ceinture verte sur les émission de CO ₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un logit intermédiaire	128
5.9	Impact de la ceinture verte sur les émission de CO ₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un scénario de prix des énergies élevés	129
5.10	Impact de la ceinture verte sur les émission de CO ₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un scénario de prix des énergies stables	130
6.1	Arbre de décision pour la disponibilité du VE	138
6.2	Valeur d'option selon différents prix moyens du véhicule électrique et pour différents coefficients de variation de ce prix	146

Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques des véhicules et prix des énergies en 2015 et scénario pour 2050.	84
4.1	Variations des émissions de CO ₂ induites par la disponibilité du véhicule électrique dans trois villes monocentriques circulaires . .	94
4.2	Part du véhicule électrique dans les déplacements (tous modes confondus) et distances moyennes pour aller au centre dans trois villes monocentriques circulaires	96
4.3	Quantité de CO ₂ évitée par véhicule électrique en circulation dans trois villes sur une année	96
4.4	Densité moyenne dans trois villes circulaires monocentriques . . .	103
4.5	Coût de la subvention par tonne de CO ₂ évitée par les véhicules électriques en circulation dans trois villes	108
5.1	Scénario pour 2050	115
5.2	Coût d'usage du kilomètre en 2015 et scénario haut pour 2050 . .	129
6.1	Caractéristiques des différentes technologies	141
6.2	Paramètres pour le calcul des ATCO en 2020	141
6.3	Valeur d'option pour différentes disponibilités du véhicule électrique	143
6.4	Somme des valeurs d'option pour la disponibilité du véhicule électrique pour les ménages français entre 2020 et 2030	144

Introduction

Face à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, le secteur des transports, notamment la mobilité privée, doit s'efforcer de devenir plus propre (IPCC et al., 2014b). En effet, le secteur des transports représente 14% des émissions mondiales de CO₂. En France cette part s'élève à 28%.

Pour réduire ces émissions, l'Union Européenne s'est fixé comme objectif une division par quatre des émissions de CO₂ dans le secteur des transports à l'horizon 2050. En France, pour répondre à cet objectif, la récente Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte¹ prévoit une diminution des émissions du secteur des transports de l'ordre des deux tiers à l'horizon 2050 et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de juillet 2016 contient un volet sur les transports².

La plupart des solutions proposées pour réduire ces émissions de la mobilité privée concernent les transports en ville. Les villes regroupent en effet la majeure partie des émissions mondiales, et cette part devrait augmenter avec l'accroissement de la population urbaine (Seto et al., 2012). Nous nous concentrerons donc ici sur les émissions liées aux transports en ville.

Le volet transport de la PPE évoque cinq moyens d'action pour réduire les émissions liées au transport : la baisse du volume via par exemple le télétravail, le report modal de la voiture individuelle vers les transports en commun et les modes doux, l'amélioration de l'efficacité énergétique du parc de véhicules, le développement des véhicules à faibles émissions et enfin l'augmentation du taux de remplissage des véhicules grâce notamment au covoiturage.

Cette décomposition des facteurs d'émissions est directement inspirée de la décomposition traditionnelle dite "ASIF", dans laquelle on distingue quatre facteurs : le volume de transport (Activity), la structure modale (Structure), l'intensité énergétique (Intensity) et l'intensité carbone du carburant (Fuel). Dans la décom-

1. LOI n2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

2. Projet de décret disponible sur : <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-programmation-pluriannuelle-de-1-energie-a1526.html>

position ASIF, le taux de remplissage est implicitement compris dans le facteur d'intensité énergétique.

Ces facteurs ne sont pas indépendants et sont généralement regroupés pour distinguer les solutions qui relèvent du progrès technologique (intensité énergétique et carbone) de celles qui relèvent de la structure de la mobilité (volume et partage modal) (Chapman, 2007).

Si l'attention porte souvent sur les solutions technologiques, des changements de la structure de nos déplacements semblent aussi nécessaires pour atteindre les objectifs ambitieux d'atténuation du changement climatique que la communauté internationale s'est fixée (Banister, 2011). Le levier "structure de la mobilité", souvent appelé levier "comportement", rassemble les solutions influençant le volume global de déplacements (distances et nombres de passagers transportés) et les solutions influençant le choix des modes de transport utilisés (véhicule privés, transport en commun, vélo, marche à pied..). Dans le cas de la France, le volet mobilité de la PPE préconise, par exemple, la mise en place de campagnes d'information auprès des ménages pour les inciter à mieux penser leurs habitudes de déplacements ou encore l'élargissement des réseaux de transports en commun (projet Grand Paris Express).

Le levier structure de la mobilité a été largement documenté dans la littérature, notamment au travers de son lien avec la forme de la ville et avec les schémas de déplacements qui en découlent (Anderson et al., 1996; Ewing and Cervero, 2001; Rickwood et al., 2008). La ville compacte et desservie par des transports en commun est souvent mise en avant comme modèle de réalisation pour ce levier, pour ses faibles émissions par habitant liées au transport (Banister, 2008).

Les mesures de restriction à l'étalement urbain (comme les ceintures vertes ou les réglementations sur les zones constructibles), la densification et la promotion des réseaux de transports en commun auprès des usagers ainsi que l'encouragement à l'utilisation des modes doux, constituent des solutions pour actionner le levier structure de la mobilité (Glaeser and Kahn, 2010). Ces solutions touchent directement à l'aménagement du territoire et les analyses de ces solutions tiennent donc compte de l'utilisation que les ménages font des transports. Inversement ces analyses notent aussi l'influence de ces solutions sur les choix de localisation des ménages et donc les schémas de déplacements.

Notons que des technologies peuvent aussi jouer un rôle dans l'activation du levier structure de la mobilité, en particulier les technologies de l'information et des télécommunications (télétravail, applications d'information pour les usagers...)

D'un autre côté, le "levier technologique" regroupe des solutions qui permettent de diminuer les émissions par kilomètre et par passager d'un mode de transport donné. Ces solutions concernent surtout les véhicules privés, qui sont le mode de transport le plus émetteur. Il s'agit, par exemple, de réduire la consom-

mation des moteurs thermiques, d'introduire des biocarburants ou encore de développer les véhicules électriques ou hybrides.

Parmi les technologies disponibles, le véhicule électrique présente l'intérêt de n'émettre pratiquement pas de CO₂ si l'électricité utilisée est décarbonée (IPCC et al., 2014b) tout en paraissant peu contraignant, puisqu'il ne semble impliquer qu'un changement à la marge de nos habitudes de déplacements.

Cependant, les solutions du levier technologique et celles du levier structure de mobilité sont le plus souvent discutées de manière indépendante, sans tenir compte des possibles rétroactions de des unes vers les autres.

La littérature s'est peu intéressée aux interactions entre l'introduction d'une solution du levier technologique en ville (comme le véhicule électrique) et la forme de la ville ou les schémas de déplacements qui en découlent. Contrairement aux analyses sur les solutions du levier structure de la mobilité, qui sont intégrées au territoire sur lequel elles portent, les analyses centrées sur le véhicule électrique ou les autres solutions du levier technologique calculent généralement un potentiel de réduction des émissions et un coût, sans distinguer les spécificités locales des territoires où cette technologie serait mise en place, ni décrire l'utilisation qui serait faite de ce véhicule.

Ce manque est souligné dans les préconisations des politiques. Ainsi, le Comité d'Experts pour la Transition Energétique (CETE) met en avant, dans son avis sur le projet de décret de la PPE³, le besoin d'une approche plus locale.

Dans cette thèse, nous apportons un éclairage dans le sens de ces préconisations en intégrant les schémas de déplacements des usagers afin d'évaluer le potentiel et le coût du véhicule électrique comme solution pour réduire les émissions de CO₂.

Précisément, nous nous intéressons dans un premier temps aux caractéristiques spatiales de la ville (forme urbaine) et à l'utilisation qui est faite de ce véhicule. Dans un deuxième temps, nous nous penchons sur la mise en oeuvre simultanée du véhicule électrique (levier technologique) et de la restriction de l'étalement urbain (levier structure de mobilité).

Ces deux premiers points nous permettent de souligner l'interdépendance des deux leviers d'action dans l'évaluation de leur potentiel de réduction des émissions.

Enfin dans un troisième temps, nous proposons d'affiner l'évaluation du coût du véhicule électrique, en nous efforçant à nouveau de tenir compte de l'utilisation qui serait faite de ce véhicule par les ménages ainsi que de l'incertitude qui entoure le déploiement du véhicule électrique.

3. Disponible sur : http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/16_-_Avis_du_CETE_31_juillet_2016.pdf

Ces trois axes sont détaillés successivement.

Tout d'abord, le potentiel de réduction d'émissions des solutions envisagées pour le secteur des transports est dépendant des spécificités de chaque pays ou territoire : préférences des individus, revenus, prix des transports, schémas de déplacements... (IPCC et al., 2014b; Creutzig et al., 2015). En changeant d'échelle, on constate que ces potentiels ne sont pas non plus uniformes selon les villes ou les communes. On note alors que pour des villes avec des niveaux de développement comparables, les politiques envisagées pour réduire les émissions peuvent différer. Dans leurs scénarios, Creutzig et al. (2012) suggèrent qu'en Europe, les petites villes devraient investir dans le réseau de pistes cyclables alors que les plus grandes devraient renforcer leur réseau de transports en commun.

De plus, il convient de s'intéresser, non seulement aux caractéristiques spatiales qui pourraient favoriser le potentiel de cette solution et son adoption, mais aussi à l'action de cette technologie sur ces caractéristiques spatiales.

Le premier objectif de cette thèse est donc d'identifier l'influence des schémas de déplacements, et par conséquent de la forme urbaine, sur le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique. Nous mettons en évidence l'importance de la taille de la population et de l'existence ou non d'un réseau de transports en commun ainsi que l'existence d'un ou plusieurs centres d'emplois.

Précisément, nous montrons que la disponibilité du véhicule électrique encourage l'étalement urbain, surtout dans les grandes villes avec un réseau de transports en commun peu développé. Mais c'est aussi dans ce type de ville que le véhicule électrique a le plus fort potentiel et qu'il permet d'éviter le plus d'émissions de CO₂. Enfin, en présence de plusieurs centres d'emplois, le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique est plus faible que dans une ville monocentrique équivalente. Ces résultats suggèrent la mise en place de politiques différenciées à l'échelle locale, qui devraient s'adapter à la structure de chaque ville.

Cette différenciation territoriale des politiques, notamment des subventions directes, pourrait s'opposer au principe d'égalité devant l'impôt en favorisant les habitants de certains territoires au nom de l'amélioration de l'efficacité des moyens engagés.

En second lieu, la littérature souligne souvent la nécessité de mobiliser conjointement le levier technologique et le levier structure de la mobilité pour réduire les émissions dans les transports (McCollum and Yang, 2009).

Ces préconisations sont renforcées par les analyses montrant que la combinaison de ces politiques crée des synergies qui optimisent le rapport coût-efficacité de la réduction des émissions (European Environment Agency, 2010).

Il convient de noter que certaines solutions ne sont pas indépendantes les unes des autres et que leur potentiel de réduction d'émissions varie selon leurs interactions. Ainsi, il n'est pas toujours possible d'additionner les potentiels de réduction de chaque solution pour évaluer le potentiel global des solutions envisagées.

Par ailleurs, nous verrons par la suite que la nature de ces interactions dépend aussi du territoire considéré.

Le deuxième objectif de cette thèse est donc d'analyser l'influence de la mise en oeuvre d'une solution appartenant au levier structure de la mobilité sur le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique. Nous montrons que dans le cas d'une ville circulaire et monocentrique, la mise en oeuvre d'une restriction à l'étalement urbain (ceinture verte) en même temps qu'une subvention au véhicule électrique est sous-additive en ce qui concerne la réduction des émissions. De plus, pour certains montants de subventions, celles-ci sont même plus efficaces seules que combinées à la mise en place d'une ceinture verte. Nous quantifions les valeurs de cet intervalle et montrons que l'amplitude de ce dernier effet varie selon le type de ville.

Enfin, la mise en oeuvre des solutions envisagées pour réduire les émissions nécessite un temps de déploiement qui ne doit pas être négligé. La décision de mise en oeuvre d'une solution doit se faire dès aujourd'hui pour pouvoir être opérationnelle dans le futur. Cette décision se fait en incertitude dans la mesure où elle s'appuie sur des anticipations du contexte futur.

Les analyses de coût de déploiement des moyens d'action pour réduire les émissions des transports dans la littérature reposent le plus souvent soit sur un ou plusieurs scénarios soit sur des analyses de sensibilité (van Vliet et al., 2011; Thiel et al., 2010; Propfe et al., 2012). Les coûts des actions déployées sont alors comparés entre eux. Cependant, ces analyses ne tiennent pas compte du rôle de l'incertitude. De plus, la plupart des analyses se concentrent sur un seul type de ménage pour comparer l'utilisation du véhicule électrique avec les autres technologies. Elles ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité des ménages qui feront le choix d'utiliser une technologie plutôt qu'une autre.

Notre analyse s'appuie sur la notion de valeur d'option pour quantifier le coût de différentes technologies de motorisation pour les ménages, en tenant compte de leur hétérogénéité et de l'incertitude qui entoure ces coûts futurs.

La valeur d'option est un concept dérivé de la finance, qui permet de considérer un investissement comme une option financière. L'investissement dans un projet est identifié à une option que l'on achète pour garantir la possibilité d'utiliser le sous-jacent à un prix donné dans le futur, ici pour utiliser les fruits de l'investissement. La décision d'exercer l'option dans le futur dépendra des conditions observées.

Le troisième objectif de cette thèse est d'évaluer dans quelle mesure une incertitude sur les coûts du transport privé (prix du carburant et coût du véhicule) fait émerger une valeur d'option associée au déploiement du véhicule électrique.

Nous considérons la disponibilité du véhicule électrique à large échelle comme une option. La valeur d'option du véhicule électrique résume alors ce que la disponibilité de cette technologie permet d'économiser en espérance par rapport à la situation où cette solution n'est pas disponible, pour l'ensemble des ménages.

Nous montrons que dans le cas du véhicule électrique, cette valeur est différente de zéro et pourrait couvrir entre 17 et 125% de l'investissement nécessaire à l'installation des bornes de recharge, selon les caractéristiques du véhicule électrique. De plus, nous montrons que, de manière contre intuitive, en tenant compte de l'incertitude sur le coût de la technologie du véhicule électrique, cette valeur d'option augmente. En effet, quand le prix de la batterie est incertain, la possibilité d'une baisse de ce prix est très intéressante financièrement pour les automobilistes.

Pour résumer, les questions associées aux trois objectifs ci-dessus sont les suivantes :

- Quel est l'impact de la distribution spatiale des ménages (donc de la forme urbaine) sur le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique ?
- Quelles sont les interactions entre la disponibilité du véhicule électrique et une solution s'appuyant sur le levier structure de la mobilité ?
- Comment valoriser la disponibilité du véhicule électrique en intégrant l'incertitude sur les prix futurs des énergies et le prix de cette technologie ?

Pour répondre à ces questions, la thèse est organisée de la manière suivante :

Dans le premier chapitre nous nous attachons à décrire le niveau et les facteurs explicatifs des émissions de CO₂ liées aux transports. Puis, nous détaillons les deux leviers (technologie et structure de la mobilité) qui regroupent les actions qui pourraient réduire ces émissions.

Les chapitres 2 et 3 décrivent les modélisations utilisées.

Pour évaluer le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique selon la distribution spatiale des ménages dans la ville et selon les interactions qu'aura cette technologie avec d'autres types de solution, il nous faut modéliser le choix du type de véhicule pour chaque ménage.

Pour cela le chapitre 2 décrit le choix des véhicules par les ménages. Nous utilisons un modèle de choix discrets en nous reposant sur le coût comme déterminant principal de ce choix. Les modèles de choix discrets tiennent compte de

la variabilité des choix des ménages en intégrant un élément aléatoire dans leur règle de décision. Cette modélisation nous permet de simuler des choix de véhicules plus réalistes. Elle est ensuite intégrée à un modèle d'économie urbaine.

Nous prenons ensuite en compte la configuration spatiale des territoires où le véhicule électrique pourrait être disponible dans le calcul du potentiel de réduction de celui-ci. Pour prendre en compte cette configuration, il est nécessaire de pouvoir décrire les interactions entre la localisation des ménages et le système de transports disponible.

Le chapitre 3 décrit le modèle employé pour modéliser la forme de la ville, notamment la répartition spatiale des ménages. Afin de calculer le potentiel du véhicule électrique selon la forme de la ville et les interactions entre cette technologie et d'autres types de solutions, nous utilisons un modèle d'économie urbaine à la Alonso (1964); Mills (1967); Muth (1969) et un modèle appliqué (NEDUM-2D). Ceux-ci nous permettent d'analyser les mécanismes des choix de localisation et leur lien avec les coûts des transports ainsi que les émissions de CO₂ associées à différentes configurations spatiales de la ville.

Le chapitre 4 compare l'influence de différentes formes de ville (distribution spatiale des ménages et système de transports disponibles) sur le potentiel de réduction d'émissions lié au déploiement du véhicule électrique. Pour cela, dans un premier temps, trois villes simplifiées, circulaires et monocentriques sont étudiées. Puis dans un second temps, nous analysons le déploiement du véhicule électrique dans une ville plus réaliste et polycentrique. Pour cela, nous utilisons le modèle NEDUM-2D, calibré sur l'agglomération parisienne en 2050.

Dans une ville monocentrique simple, l'introduction du véhicule électrique encourage l'étalement urbain mais permet d'éviter d'autant plus d'émissions de CO₂ que la ville est étalée, c'est à dire avec un profil de densité aplati. Le polycentrisme atténue ce résultat. Le potentiel de réduction des émissions du véhicule électrique, n'est donc pas identique selon la configuration du territoire, et cela d'autant plus que la disponibilité de ce véhicule modifie cette configuration.

Nous pouvons alors différencier des villes types selon le potentiel de réduction d'émissions induit par l'introduction du véhicule électrique et donc proposer une répartition des efforts des politiques de déploiement du véhicule électrique entre les villes mais aussi au sein de la ville. Cependant, cette meilleure répartition pourrait se faire au détriment de l'équité territoriale et s'opposer au principe d'égalité devant l'impôt.

Le chapitre 5 montre que le potentiel de réduction du véhicule électrique peut aussi être affecté par d'autres politiques mises en place dans la ville telle une restriction à l'étalement urbain. L'impact de l'association d'une politique de dévelop-

pement du véhicule électrique avec cet autre type de politique n'est pas uniforme selon le territoire concerné. Pour étudier l'association du véhicule électrique avec une politique s'appuyant sur le levier structure, nous prenons l'exemple de la mise en place d'une ceinture verte.

Les résultats montrent que l'addition des potentiels d'émissions évitées par chacune des politiques déployée seule, est systématiquement supérieure au potentiel des deux déployées simultanément. Ces politiques sont sous-additives.

L'impact en termes de réduction d'émissions, d'une ceinture verte dans une ville dépend de la politique d'incitation à l'achat du véhicule électrique (subventions). La subvention au véhicule électrique diminue l'impact de la ceinture sur les émissions. Pour certains montants de subvention au véhicule électrique on constate même une augmentation des émissions.

Le chapitre 6 présente le calcul de la valeur d'option associée au déploiement du véhicule électrique en France. En présence d'incertitude sur les futurs prix des carburants et de ménages hétérogènes (avec des kilométrages différents), la valeur d'option est strictement positive.

Nous montrons aussi qu'en tenant compte de l'incertitude sur le futur prix du véhicule (prix des batteries), cette valeur d'option augmente. Les formes de la répartition des kilométrages et des anticipations sur le prix de ces batteries jouent un rôle essentiel dans ce résultat. La disponibilité du véhicule électrique peut être considérée comme une sorte d'assurance sur le coût futur du système de mobilité français.

Les chapitres 4, 5 et 6 s'appuient sur des articles écrits durant la thèse et répondant aux questionnements précédents concernant l'introduction du véhicule électrique en ville. Ces articles sont restitués en annexe.

Chapitre 1

Mobilité des passagers en ville et émissions de CO₂

Les émissions liées aux déplacements en ville représentent une part non négligeable des émissions mondiales et font donc partie des enjeux de l'atténuation du changement climatique (IPCC et al., 2014b). Pour décrire ces émissions, la décomposition ASIF (Activity, Share, Intensity, Fuel), initialement proposée par l'AIE (Schipper et al., 2000) fait la distinction entre chacun des facteurs d'évolution.

Ces facteurs peuvent ensuite être regroupés en deux catégories et font écho à la distinction entre deux leviers d'actions qui définissent deux stratégies pour réduire les émissions des transports en ville. Le premier levier est le levier structure de la mobilité, qui s'appuie sur des changements de la structure de la ville, des transports et des comportements des utilisateurs. Le second, le levier technologique, repose sur le progrès technologique comme moyen de réduire les émissions.

Nous allons décrire dans ce chapitre les composantes de ces leviers et les politiques associées à chacun. Nous verrons que les analyses portant sur le levier structure sont toujours inscrites dans le territoire où elles s'appliquent. Les composantes du levier structure (volume de mobilité et le partage modal) sont liées à la forme urbaine et aux spécificités locales qui définissent les schémas de déplacements.

Inversement, les solutions du levier technologique, comme le déploiement du véhicule électrique, sont souvent étudiées indépendamment du territoire dans lequel elles vont être déployées. Plus précisément, les études s'intéressent peu à l'évaluation du potentiel des solutions du levier technologique à l'échelle locale, comme la ville. Or il nous semble nécessaire de nous pencher sur les différences de potentiel entre les territoires, dans la mesure où l'utilisation de ces nouvelles

technologies peut varier selon les schémas de déplacements, qui sont différents selon ces territoires.

1.1 Etat des lieux des émissions de CO₂ dues à la mobilité privée en ville

Les déplacements privés en ville engendrent des émissions de gaz à effet de serre (notamment de CO₂), responsables du réchauffement climatique.

Les émissions de gaz à effet de serre attribuées aux transports représentent 6.4G tonnes de CO₂ en 2010 (IPCC et al., 2014b), soit 22% du total des émissions mondiales liées à la consommation d'énergie et 14% du total des émissions dans le monde. Par ailleurs, le volume et la part de ces émissions liées au transport dans le total des émissions mondiales augmentent chaque année.

Parmi le total des émissions attribuées au transport, celles du secteur routier dominant : 70% d'entre elles sont associées à ce mode (IPCC et al., 2014b). Dans le transport routier, le transport de passagers représente 42% (IPCC et al., 2014b) de l'énergie consommée par ce mode de transport. De plus, le transport routier dépend à 96% du pétrole comme source d'alimentation en énergie et cette consommation d'énergie devrait augmenter de 50% d'ici 2030 et 80% d'ici 2050 selon le scénario de référence de l'EIA (EIA, 2009). Les émissions de CO₂ associées pourraient augmenter plus rapidement encore selon ce même scénario, à cause de l'utilisation de carburant plus émetteurs, comme la liquéfaction du charbon. L'influence des transports privés sur le réchauffement climatique est donc loin d'être négligeable.

Les villes, quand à elles, représentent entre 60% et 80% des émissions liées à la consommation d'énergie dans le monde (Satterthwaite, 2008; Hoornweg et al., 2011).

Il faut cependant noter que les méthodes d'attribution des émissions à une ville ne sont pas uniformisées, il n'existe pas de consensus sur l'approche à avoir pour compter les émissions d'une ville. Concernant les transports, par exemple, doit on compter les émissions des conducteurs qui traversent la ville pour rejoindre leur résidence à l'extérieur de la ville ? Doit on compter les émissions des avions partant ou arrivant dans une ville ? Selon les règles de calcul adoptées, mais aussi selon les villes observées, Dodman (2009) relève des estimations de la part des émissions du transport, dans le total attribué à la ville, allant de 10% pour les villes chinoises comme Shanghai et Pékin, jusqu'à 60% pour Sao Paulo.

Au total, pour Satterthwaite (2008), le transport de passager en ville peut être relié en moyenne à 8% des émissions totales mondiales, en supposant que 70% des émissions du transport se situent dans les villes.

Les perspectives d'évolution dans un scénario de référence s'accordent sur une augmentation de la part et du volume total des émissions liées au transport en ville. Le GIEC rapporte que sans politique volontariste, les émissions des transports pourraient doubler à l'horizon 2050, essentiellement dans les pays en voie de développement (IPCC et al., 2014b). Les principaux facteurs de cette possible augmentation sont l'urbanisation et le taux de motorisation qui augmentent en lien avec les revenus et la population.

En effet, Seto et al. (2012) montrent par exemple que si l'urbanisation continue à croître au rythme actuel, la surface urbanisée mondiale pourrait être multipliée par trois en 2030 par rapport à 2000, celle-ci étant entraînée principalement par les villes des pays en voie de développement.

D'autre part, Creutzig et al. (2015) montrent, à l'aide d'un modèle économétrique, que la consommation d'énergie dans les villes, entraînée par la croissance de la population urbaine et l'utilisation des transports, pourrait être multipliée par trois à l'horizon 2050 si rien n'est fait pour limiter la consommation.

Pour mieux analyser les facteurs explicatifs de l'évolution des émissions liées au transport, celles-ci peuvent être détaillées selon la décomposition ASIF.

1.2 Décomposition ASIF des émissions

Le rapport du GIEC (IPCC et al., 2014b) suit la décomposition de type ASIF pour analyser les facteurs explicatifs des évolutions des émissions dans les transports. L'acronyme anglais ASIF¹ correspond à la décomposition multiplicative suivante :

$$\begin{aligned} \text{Emissions totales} = & \sum_{\text{Carburant, Mode}} \text{Volume}_{pkm} \times \text{Partage modal } \% \text{ part du mode} \\ & \times \text{Intensité énergétique du mode}_{MJ/pkm} \times \text{Intensité carbone}_{CO2e/MJ} \end{aligned} \quad (1.2)$$

En détaillant l'évolution de chacun des membres de cette formule, nous pouvons analyser l'évolution des émissions liées aux transports dans le monde.

Le premier facteur décrit le volume de mobilité total des passagers en kilomètres parcourus, mesuré en passager-kilomètre (pkm). Cela correspond au nombre de kilomètres parcourus avec un moyen de transport, multiplié par le nombre de

1.

$$\begin{aligned} \text{Total GHG emissions} = & \sum_{\text{Fuel, Mode}} \text{Activity}_{pkm} \times \text{Structure } \% \text{ share of mode} \\ & \times \text{Intensity of energy of mode}_{MJ/pkm} \times \text{Fuel carbon intensity}_{CO2e/MJ} \end{aligned} \quad (1.1)$$

passagers déplacés. Ce facteur a augmenté tout au long du siècle dernier en suivant d'une part le volume de l'activité économique, et l'augmentation de la population d'autre part. Même en rapportant le volume de mobilité à la taille de la population, Schafer (2015) calcule une augmentation moyenne des passagers-kilomètres par personne de 3.3% par an aux États-Unis entre le début de XXème siècle et 2010. Le graphique 1.1 illustre cette augmentation pour les États-Unis.

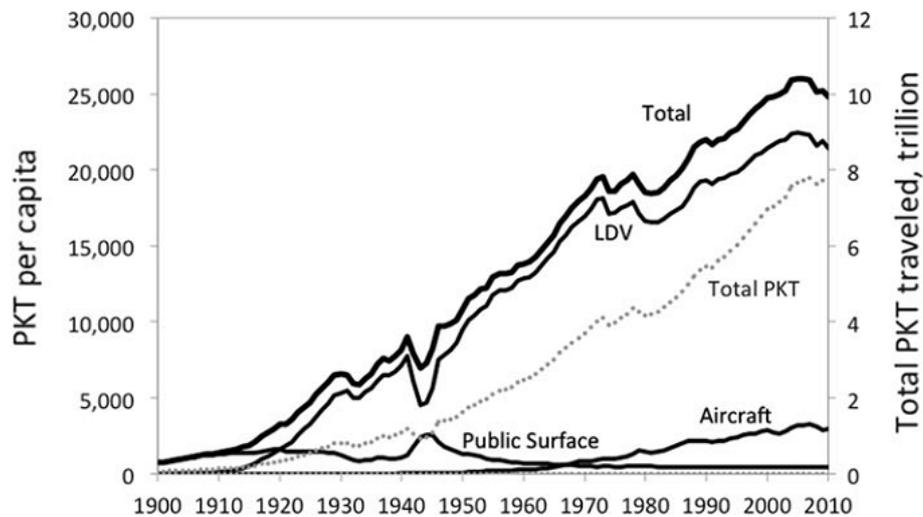


FIGURE 1.1 – Evolution des pkm (pkt en anglais) par personne pour différents mode de transport (LDV = véhicule privé) entre 1900 et 2010 aux États-Unis. (Source : A.Schafer, 2015)

Le lien entre croissance du PIB et du volume de mobilité est la principale explication de l'augmentation du volume de mobilité (Schafer and Victor, 2000).

Néanmoins, la plupart des pays développés semblent atteindre un plateau. Alors que le PIB continue d'augmenter, le volume de mobilité par habitant stagne ou décline (Millard-Ball and Schipper, 2011). Les raisons de ce découplage sont mal comprises mais suggèrent un effet de saturation des contraintes de temps et de budget des ménages (Metz, 2010).

Dans les pays en développement, ce découplage n'est pas encore observé et le volume de mobilité continue d'augmenter. Certaines analyses suggèrent ce-

pendant que ces pays atteindront le plateau plus rapidement, à cause de densité urbaine élevées et donc de plus grandes contraintes sur les infrastructures nécessaires (Figuerola and Ribeiro, 2013).

Les scénarios portant sur l'évolution de ce facteur s'accordent à montrer que le volume total de la mobilité va encore augmenter au niveau mondial (IPCC et al., 2014b). Cette augmentation est portée par la hausse des revenus et de la population dans les pays en développement.

Le deuxième facteur explicite l'influence du partage modal sur les émissions totales. Dans les pays industrialisés, lors de la première partie du XXème siècle, la part de la voiture dans les passagers-kilomètres s'est accrue, puis celle-ci s'est stabilisée. L'évolution de la part modale de la voiture est allée de paire avec l'augmentation du taux de motorisation des ménages dans les pays industrialisés (Figure 1.3), puis s'est stabilisée avec ce même taux. Au États Unis par exemple, le graphique 1.2 montre une stabilisation de la part modale de la voiture à partir de années 50 et même une diminution à partir des années 1970. En absolu, le nombre de passagers-kilomètres effectués en voiture semble diminuer à partir de 2005 (Graphique 1.1).

L'amplitude de ce phénomène, appelé "peak car use", varie selon les pays ou les territoires et la définition des variables étudiées (Millard-Ball and Schipper, 2011; Goodwin, 2012; Newman and Kenworthy, 2011b). Les explications de ce ralentissement de l'utilisation de la voiture sont diverses. Goodwin (2012) les classe en deux catégories. La première s'appuie sur des facteurs économiques : augmentation du prix des carburants, et surtout, découplage entre croissance des revenus et mobilité (effet de saturation). La seconde catégorie met en avant les changements culturels et sociaux : désintérêt pour la voiture, nouvelles technologies de communication, prise de conscience de l'impact de la voiture sur la santé et l'environnement... Newman and Kenworthy (2011b) soulignent aussi l'effet du ralentissement de l'étalement urbain dans les pays développés.

Cependant, le phénomène de "peak car use" ne concerne que les pays développés. Les projections de cette augmentation du taux de motorisation pour les pays en développement, laissent prévoir une augmentation de la part modale de la voiture dans les déplacements pour ces pays (Dargay et al., 2007), et donc une augmentation des émissions.

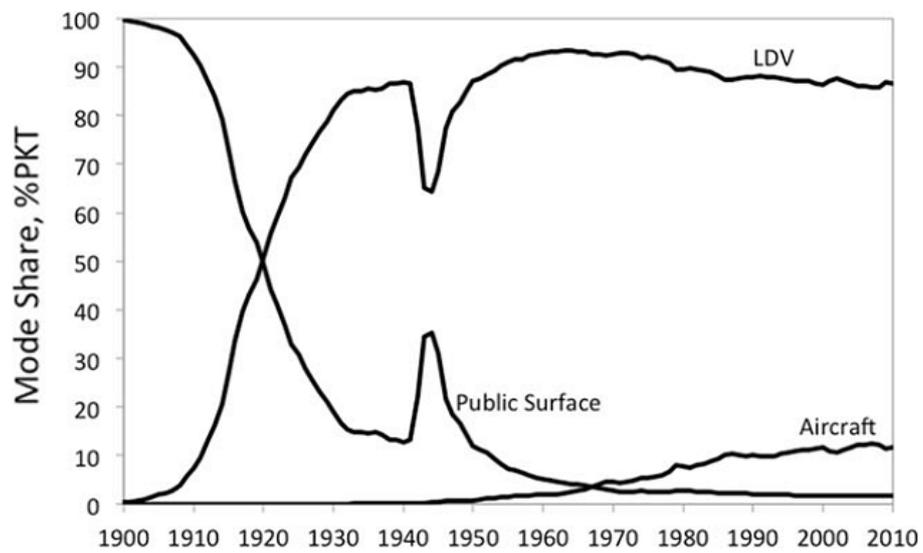
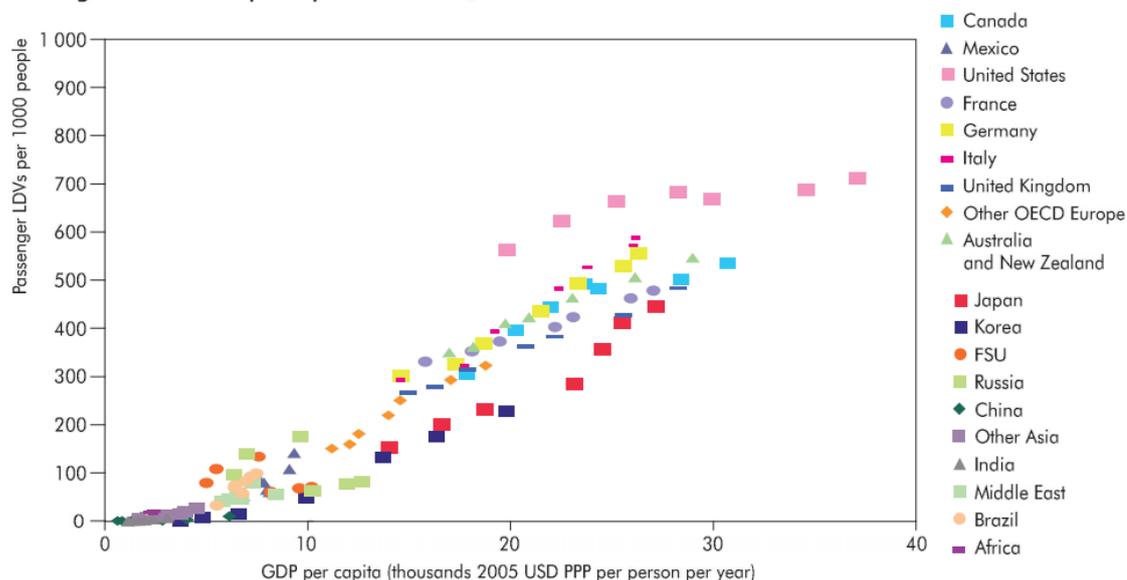


FIGURE 1.2 – Évolution des parts modales dans les pkm (pkt en anglais) dans le transport de passager entre 1900 et 2010 aux États-Unis (LDV = véhicule privé). (Source : A.Schafer, 2015)

Passenger LDV ownership and personal income, 1970-2005



Source: IEA Mobility Model database.

FIGURE 1.3 – Taux de motorisation selon les régions (source : IEA(2009))

Le troisième facteur (Intensité énergétique) est le seul à avoir joué un rôle de modération dans le total des émissions au cours des années passées. En effet la consommation énergétique des véhicules a diminué, sous l'influence des contraintes imposées par les réglementations aux constructeurs en matière d'émissions (CAFE, standards européen...), comme le montre le graphique 1.4, et suite aux incitations destinées aux consommateurs (financières et informatives) (IPCC et al., 2014b). Ces réglementations existent dans la plupart des pays développés, mais aussi dans les pays en voie de développement (par exemple en Chine et en Inde). Ces réductions de consommation résultent en premier lieu de la réduction de la taille et du poids des véhicules ainsi que de la mise en service de nouveaux éléments techniques comme les sixième et septième vitesses.

Du côté des consommateurs, des politiques d'incitations financières comme les taxes à l'achat ou le système de bonus malus ont été mises en place. Enfin les taxes sur l'utilisation des véhicules (prix du carburant ou péages) permettent de limiter l'effet rebond que pourrait induire la disponibilité de véhicules moins polluants.

L'effet rebond définit l'augmentation de l'utilisation des véhicules et donc, de la consommation totale de carburant, faisant suite à une baisse du prix du carburant ou une amélioration de la consommation unitaire des véhicules. Greening et al. (2000) rapportent que cet effet est plutôt faible, le volume de mobilité (en

véhicule kilomètre) augmenterait de 10 à 30%, pour une augmentation de 100% de l'efficacité énergétique du véhicule, selon les estimations. Small and Van Dender (2007) estiment que cet effet rebond est devenu moins intense au cours de la seconde moitié du vingtième siècle suite à la baisse des prix du carburant et la hausse des revenus réels. West et al. (2015) montrent quant à eux que cet effet est inexistant, car les ménages achètent des véhicules qui consomment moins mais qui sont aussi plus petits et moins puissants, ce qui décourage l'augmentation du volume de mobilité.

La faiblesse de cet effet rebond est à mettre en lien avec à la faible élasticité de la demande de transport aux prix du carburant. Ce point est détaillé en fin de chapitre, dans la section 1.4.5.

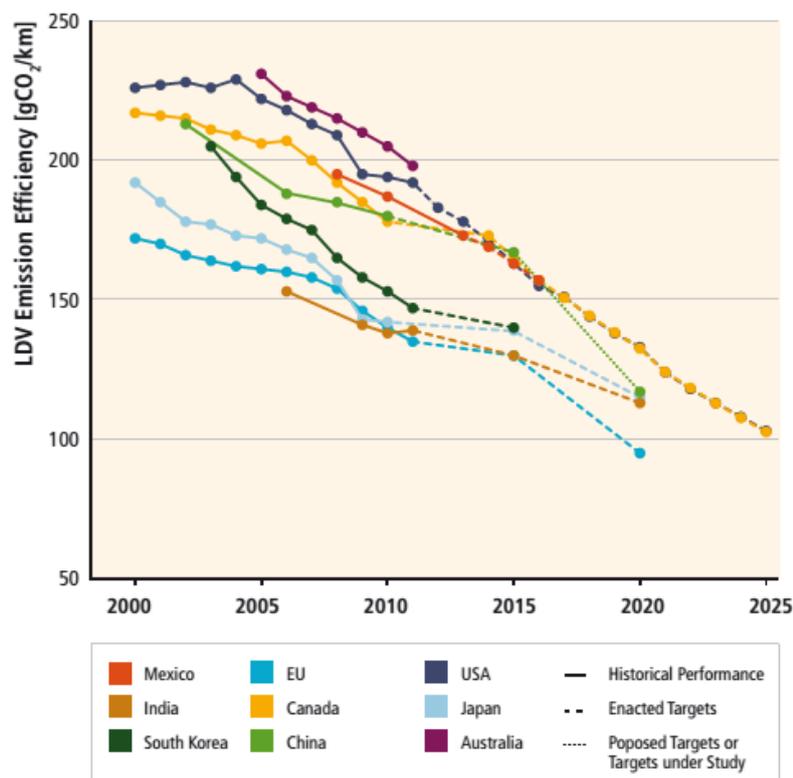


FIGURE 1.4 – Standards d'émissions historiques et futurs (source :IPCC et al,2014b)

Malgré ces améliorations, le moteur thermique reste particulièrement inefficace en terme de rendement par personne déplacée. Lovins (2005) calcule qu'une fois déduite l'énergie perdue en chaleur et vibration du moteur, en chaleur diffusée par les pneus et en accessoires de confort (air climatisé par exemple), environ 1%

de l'énergie utilisée sert effectivement à déplacer le conducteur. Ce chiffre pourrait être amélioré, notamment pour diminuer la perte due à la dissipation en chaleur et en bruit qui représentent 87% de l'énergie utilisée par le moteur à combustion interne. Des technologies utilisant d'autres sources d'énergie sont actuellement explorées. Celles-ci permettraient de diminuer encore la consommation énergétique mais aussi de modifier un quatrième facteur.

Le quatrième facteur concerne l'intensité carbone du type d'énergie utilisé. Ce facteur résume les émissions des différentes technologies utilisées. Plus précisément, concernant les véhicules privés, ce facteur permet de prendre en compte l'utilisation potentielle du véhicule électrique, des biocarburants, du véhicule hydrogène ou encore du véhicule au gaz. Jusqu'à aujourd'hui la grande majorité des déplacements en véhicule privé sont effectués avec un moteur à essence ou diesel (94% contre 1% pour l'électricité, 2% pour les biocarburants, et 3% pour le gaz et autres types de carburants). L'évolution de ce facteur va dépendre fortement des évolutions des performances et du coût des options alternatives au moteur thermique.

Les actions sur ces quatre facteurs visant à diminuer les émissions du secteur des transports peuvent être regroupées dans deux leviers. Ces leviers d'action sont des ensembles de solutions pour réduire les émissions.

Un premier levier, que la littérature appelle "behavior" ou "comportement" (Chapman, 2007; Schafer, 2012), regroupe les actions concernant les effets de structure : le volume de mobilité et le partage modal. Cependant, il nous semble que ces comportements peuvent être expliqués par les infrastructures des transports : forme urbaine, routes, réseau de transport en commun. Nous préférons donc appeler ce levier "structure de la mobilité", car le mot comportement éloigne les déterminants du volume de mobilité et du partage modal induits par les infrastructures existantes. De plus, les comportements ont aussi une influence sur le second levier (comportement d'achat et d'usage des nouvelles technologies). Le deuxième levier, que nous appellerons le levier technologique, se compose des actions s'appliquant aux technologies : amélioration de l'efficacité énergétique des technologies et utilisation de carburants moins intenses en CO₂ et plus particulièrement du véhicule électrique.

Ce découpage ne sous-entend pas que les solutions propres à chaque levier d'action sont indépendantes. En effet, certaines solutions du levier technologique peuvent influencer la structure de la mobilité (par exemple : informatique et télétravail réduisent le volume de transport). Mais ce découpage permet de distinguer les solutions selon les principaux facteurs qu'elles vont influencer.

Ces deux leviers d'action sont décrits plus explicitement dans les deux sections suivantes.

1.3 Le levier structure de la mobilité

Le levier structure de la mobilité regroupe les actions visant à modifier le volume des déplacements et leur partage modal. Nous allons voir qu'en ville ces deux facteurs ne sont pas indépendants et sont tous deux liés à la forme urbaine.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au lien entre le levier structure de la mobilité (volume et partage modal) et les émissions des transports. Nous verrons que nous ne pouvons pas parler de l'influence de ce levier sur les émissions sans parler de forme de la ville. Dans un deuxième temps, nous allons donc détailler les résultats montrant l'influence de la forme d'une ville sur les émissions des transports. Ceci nous permettra, dans un troisième temps, d'expliquer les émissions des transports en ville au travers des interactions entre la forme urbaine et la structure de la mobilité .

Cette relation est au centre de la définition du levier structure de la mobilité. Les solutions du levier structure de la mobilité sont donc presque toujours analysées en fonction des spécificités du territoire dans lequel elles s'intègrent.

1.3.1 Structure de la mobilité et émissions

Volume de mobilité et émissions

L'augmentation des émissions liées aux transports en ville est due en partie à la croissance du volume de mobilité. La hausse de ce volume de mobilité est tout d'abord une conséquence directe de l'augmentation de la population urbaine.

Ensuite l'augmentation du volume de mobilité est aussi à mettre en lien avec la réduction de la densité moyenne des villes. Un des facteurs explicatifs de ce lien est l'accélération de l'étalement urbain à partir de la moitié du XXe siècle dans toutes les villes du monde. En augmentant les distances parcourues en moyenne, l'étalement urbain augmente aussi le volume de mobilité.

Cependant, il faut noter que le mouvement d'augmentation des distances parcourues pourrait ralentir à l'avenir. Récemment, Schneider et al. (2015) ont mesuré que les villes chinoises ralentissaient leur étalement voir, augmentaient leur densité moyenne. La tendance à l'étalement est donc peut être en train de fléchir. Selon Newman and Kenworthy (2011b) certaines villes ont atteint un "mur" d'expansion, qui se situe aux alentours de 40-50km de diamètre (soit une heure de transport en voiture par jour).

Ce phénomène peut notamment être illustré par la stagnation du taux moyen d'utilisation de la voiture ("peak car") expliquée dans la section 1.2 .

Partage modal et émissions

Le lien entre volume des émissions et structure des transports peut aussi s'expliquer par le mode de transport utilisé. Tous les modes de transports ne sont pas équivalents en terme d'émissions.

Les transports en commun au sens large regroupent l'ensemble de modes de déplacements permettant de transporter plusieurs personnes sur un même trajet. Les trains, les métros, les tramways et les bus sont les principaux moyens de transport en commun proposés en ville. Les transports en commun sont généralement organisés en réseaux prédéfinis (sauf transports en commun à la demande) et relèvent souvent en partie de financements et de services d'exploitation publics. Le déploiement de réseaux de transport en commun offre aux ménages une alternative aux déplacements en véhicules privés.

Les modes doux sont une autre alternative aux véhicules privées. Ils regroupent la marche à pied, le vélo et l'ensemble des déplacements non émetteurs, sollicitant la propulsion humaine.

Ces modes de transports sont parfois perçus comme plus contraignants que le véhicule privé (détour pour rejoindre les stations, effort physique, attente...) mais se révèlent moins émetteurs de CO₂. Par exemple, les transports en commun permettent d'améliorer le rendement énergétique du déplacement par personne et utilisent parfois d'autres sources d'énergie que le pétrole.

Newman and Kenworthy (2011a) montrent que les émissions des transports en commun par passager-kilomètre (pkm) sont plus faibles que celles du véhicule privé. Les émissions par passager kilomètre des transports en commun représentent entre un cinquième et un tiers des émissions du véhicule privés, selon les pays. Selon Newman and Kenworthy (1999), un passager kilomètre effectué en rail permet d'éviter 5 à 7 pkm en voiture. C'est ce qu'on appelle le "transit leverage effect". Mis en évidence en premier par Pushkarev and Zupan (1980), ce levier peut avoir plusieurs explications selon Newman and Kenworthy (1999). La présence d'un réseau de transport en commun pousse les gens à habiter plus près des stations (donc à réduire les trajets), certains ménages abandonnent leur véhicule et ne se déplacent donc plus en voiture pour l'ensemble de leurs trajets. Enfin, certains s'habituent à marcher et à utiliser les modes doux. La réduction de l'utilisation de l'automobile en ville et sa substitution par des modes de déplacement moins émetteurs semblent donc être une solution pour réduire les émissions liées aux transports.

Cependant, nous notons que les mécanismes sous-jacents au "transit leverage effect" sont en partie liés aux changements de densité induits par l'introduction des transports en commun.

La substitution passe donc en partie par une restructuration de la forme urbaine car la mise en place d'un réseau de transport en commun n'est efficace que pour des villes denses.

Le travail de Newman and Kenworthy (1989) montre que la corrélation entre densité et énergie des transports que nous allons détailler dans le paragraphe suivant, s'explique traditionnellement par l'efficacité des modes de transport utilisés (public ou privés) dans chaque type de ville. Sur la figure 1.5 on voit que l'efficacité énergétique des transports publics croît avec la densité. Le densité permet une plus grande proximité avec les réseaux de transports en commun, ainsi que des distances à parcourir plus courtes, ce qui augmente l'utilisation de ces transports en commun.

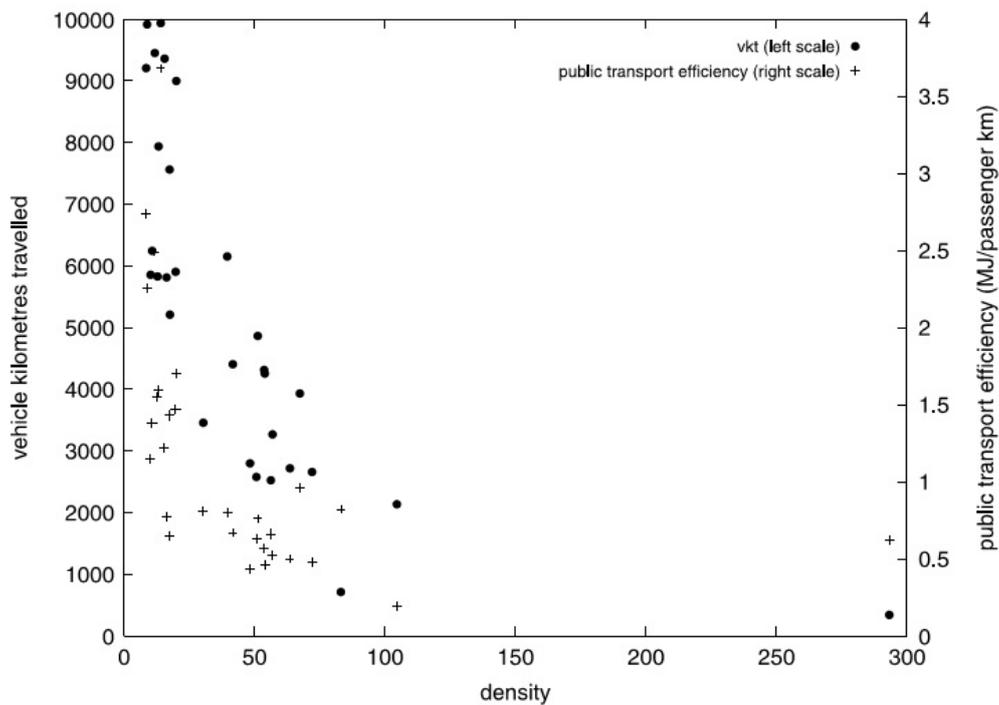


FIGURE 1.5 – Densité urbaine, utilisation du véhicule privé (vkm) et efficacité énergétique des transports en commun (source : Newman et Kenworthy, 1989)

Pour mieux comprendre le lien entre structure des transports et émissions, il faut détailler le lien entre forme urbaine et émissions.

1.3.2 Forme urbaine et émissions

Une définition de la forme urbaine

Le concept de forme d'une ville est large. D'abord parce qu'elle doit se concevoir en trois dimensions, ensuite parce qu'elle se définit aussi en fonction de la place accordée à chaque activité, du mélange de ces activités et de leurs interactions.

La structure spatiale d'une ville peut donc se définir suivant plusieurs critères. Ici, nous retiendrons deux critères principaux qui sont interdépendants.

Le premier critère est relatif au profil de densité ou gradient de densité de la ville. Le profil de densité (ou gradient de densité) est utilisé pour définir la forme urbaine dans la dimension relative aux zones de résidences des habitants.

Celui-ci représente les densités en chaque point de la ville, en fonction de la distance au centre. Cette caractéristique est fréquemment utilisée pour distinguer les formes urbaines. Elle permet de visualiser sur une image, la répartition de la population en trois dimensions.

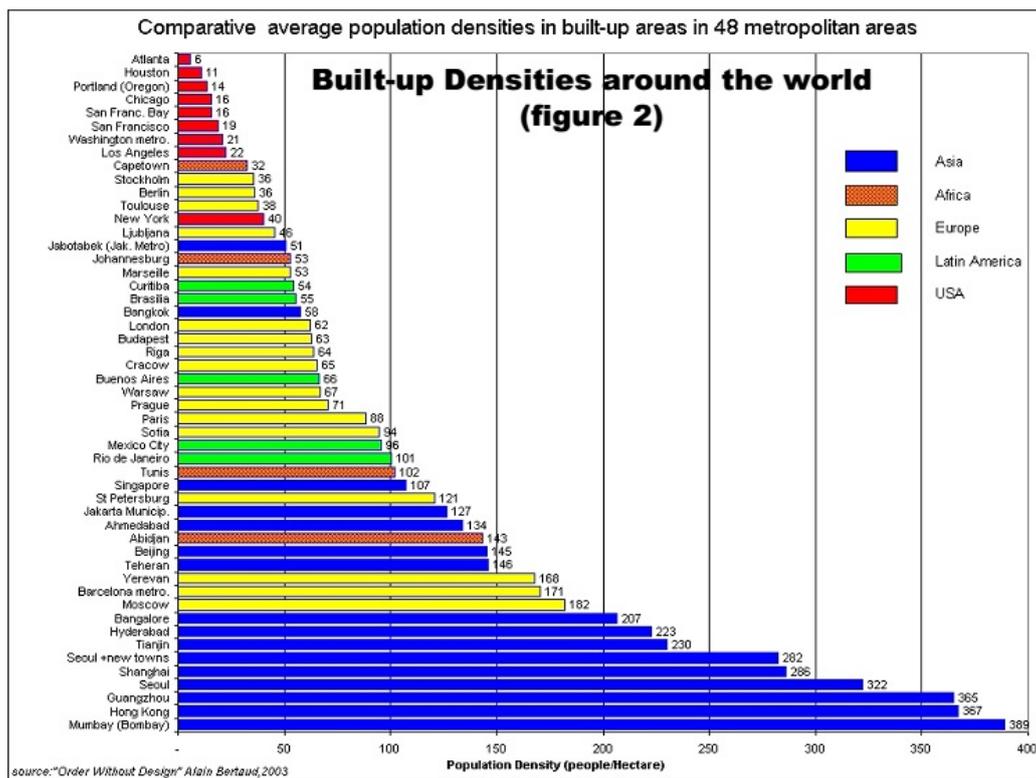


FIGURE 1.6 – Densités moyennes de 48 villes dans le monde (source : A.Bertaud, 2002a)

Associée à chaque profil de densité, nous pouvons calculer une densité moyenne sur la ville. Sur la figure 1.6 nous notons que les villes, classées par rapport à leur densité moyenne, forment des groupes qui correspondent en partie à la régions dans laquelle elles se situent. Pour Bertaud (2002b) les différences de densité entre les villes résultent de préférences culturelles autant que des mécanismes du marché entre offre et demande de logement.

Ensuite, la forme urbaine peut aussi se définir à travers le schéma de déplacement de ses habitant et donc le nombre de son (ou ses) centre d'emplois. Ceci définit le second critère que nous retenons.

Nous distinguons ainsi les villes monocentriques, avec un centre principal qui concentre toutes les activités et emplois, des villes polycentriques, avec plusieurs centres qui peuvent être d'importance différente. Les distances entre les zones d'habitation et le centre expliquent le volume de mobilité nécessaire aux déplacements quotidiens des habitants. Cependant Bertaud (2001) souligne que la plupart des villes se trouvent entre ces deux archétypes et traditionnellement, les villes naissent monocentriques et tendent à devenir polycentriques en grandissant. Cette tendance au polycentrisme s'est accélérée en partie avec les technologies de communication développées au cours du 20ème siècle (voitures mais aussi télécommunications) car les centres d'emplois et de consommation pouvaient se disperser tout en restant accessibles les uns des autres.

Nous avons choisi de considérer ces deux critères pour décrire les formes de villes, mais il existe de nombreuses autres caractéristiques de formes de villes. Par exemple, Bertaud (2001) définit aussi un indice de dispersion : le ratio de la distance moyenne par personne au centre d'emploi et de la distance moyenne au centre d'un cercle dont l'aire serait égale à la surface de la ville. Ewing et al. (2003) calculent un indice de compacité urbaine qui associe densité résidentielle, composition du quartier en habitation, emploi et services, dynamisme des centres d'activités et centres villes et accessibilité du réseau routier.

Émissions et forme urbaine

Le lien entre les émissions d'une ville liées au transport et les deux précédents critères étudiés (nombre de centres d'emploi et densité) a été largement documentés. Rickwood et al. (2008) et Ewing and Cervero (2001) résument les différents éléments de la littérature sur ce sujet.

Le travail de Newman and Kenworthy (1989) analyse le lien entre énergie utilisée pour le transport et densité urbaine. Il en ressort que l'énergie utilisée pour le transport décroît avec la densité moyenne de la ville (Fig.1.7) .

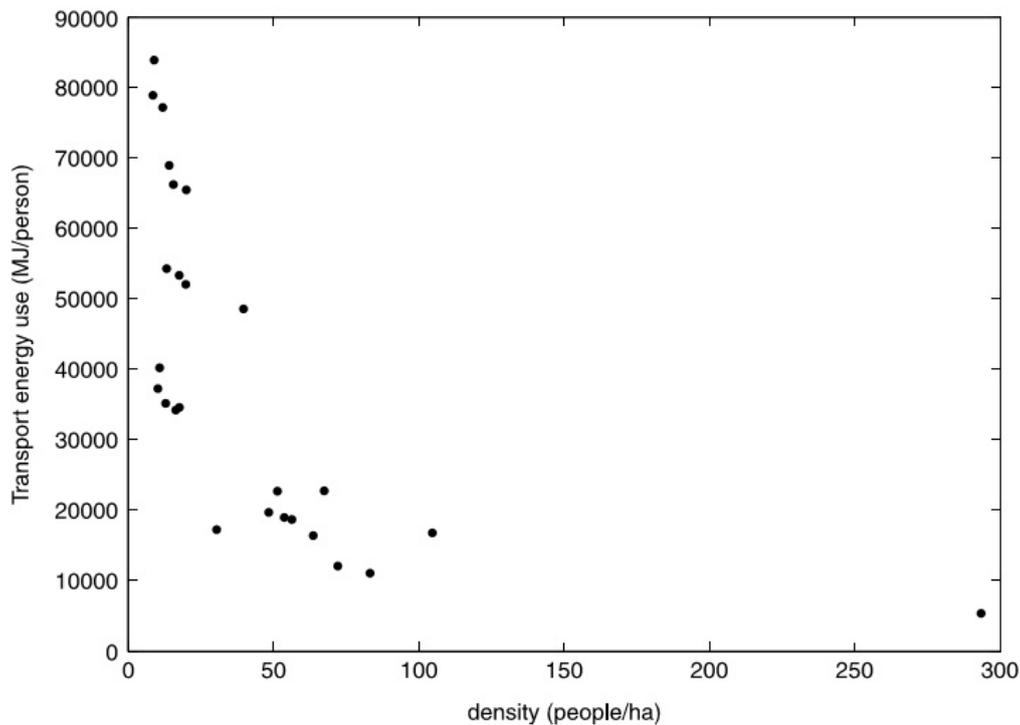


FIGURE 1.7 – Consommation d’énergie des transports et densité (source : Newman et Kenworthy 1989)

Cependant Le Néchet (2011), souligne que ces travaux ne prennent en compte aucune ville africaine ou sud-américaine ce qui limite la portée de ces résultats.

Newman and Kenworthy (2011a) reprennent cette relation décroissante entre utilisation d’énergie pour le transport et densité de la ville et montrent que cet effet est aussi visible au sein d’une même ville. Plus la densité décroît, plus les transports sont utilisateurs d’énergie.

Glaeser and Kahn (2010) montrent que les centres villes semblent avoir des émissions plus faibles que les banlieues éloignées. Norman et al. (2006) montrent eux aussi que les banlieues à faible densité génèrent plus d’émissions liées au transport que les centres denses. Ceci s’explique par des distances à parcourir plus faibles dans les centres villes.

Ces résultats nous permettent d’établir le lien entre forme urbaine et volume des émissions.

Cependant si la corrélation est avérée, le lien causal est plus difficile à établir. Les interactions entre densité et énergie utilisée dans les transports évoluent conjointement. Rickwood et al. (2008) donnent l’exemple d’une ville où on augmenterait la densité loin des zones d’emploi sans mettre en place de ligne de

transport public, cela aurait pour résultat d'augmenter les trajets en véhicule privés et donc la consommation d'énergie. L'effet marginal de l'augmentation de la densité serait alors d'augmenter la consommation d'énergie.

Nous avons constaté le lien entre structure des transports et émissions et entre forme urbaine et émissions. Ceci va nous permettre de détailler le lien entre structure des transports et forme urbaine. Ce lien est souvent mis en avant dans les analyses portant sur les projets du levier structure de la mobilité pour réduire les émissions.

1.3.3 Lien entre structure des transports et forme urbaine pour expliquer les émissions

Corrélation entre volume, partage modal et forme urbaine

Le volume de transport et le partage modal sont étroitement liés à la forme de la ville.

Ewing et al. (2003) montrent que la densité est inversement corrélée au taux de motorisation, au trafic par personne, et positivement corrélée à l'utilisation des transports en commun.

Newman and Kenworthy (2011a) montrent que les villes les moins denses sont celles où les modes doux et les transports en commun sont le moins utilisés. Ces villes montrent une dépendance à la voiture. Le graphique 1.5 montre que l'utilisation du véhicule privé décroît avec la densité. ? trouvent aussi que la densité de la ville explique de façon significative le taux de possession d'un véhicule, les distances par tête et la part des transports en commun ou de la marche à pied. Newman and Kenworthy (2006) montrent qu'en reliant densité de l'activité (emplois et résidents) à la consommation d'énergie pour le transport ou l'utilisation des véhicules privés, on peut déterminer un seuil, aux alentours de 35 emplois et résidents par hectare, au delà duquel, la dépendance à l'automobile est réduite. Ce seuil se retrouve parmi un grand nombre de villes et au sein des villes elles même. Il est aussi stable dans le temps.

Frank and Pivo (1994) soulignent dans leur revue de littérature qu'on distingue deux positions concernant l'impact de la forme urbaine sur les choix de transport. Certains montrent que ce lien existe alors que d'autres, plus sceptiques, soulignent que la densité en elle même n'est qu'un proxy pour d'autres facteurs comme la présence d'un réseau de transport en commun ou des coûts de garage plus élevés. Ils montrent néanmoins eux aussi l'existence de seuils de densité impactant le choix du mode de transport. Par exemple, l'utilisation des transports en commun dans une localité augmente fortement au-delà de 185 emplois par hectares.

La corrélation que nous venons d'illustrer, peut donner lieu à deux interprétations concernant le sens de causalité que nous allons maintenant explorer.

Les transports déterminent la forme urbaine...

Historiquement, en regardant la période à laquelle la population d'une ville s'est accrue, nous pouvons illustrer et expliquer la relation entre forme de la ville et transports. En effet Newman and Kenworthy (1996) distinguent trois types de ville en fonction de la période d'accroissement de la population. La première ville est la "walking city", elle s'est créée il y a parfois 10 000 ans et s'est développée jusqu'au milieu du XIXe siècle. Cette ville est caractérisée par une forte densité et un petit rayon (5km). Cela correspond par exemple aujourd'hui au centre historique de la plupart des villes européennes. Puis est apparue la "transit city", jusqu'au milieu du XXe siècle. La ville s'est alors développée autour du réseau de train et tramway en reliant parfois plusieurs petites "walking city" ou alors créant des villes plus grandes, comme aux États-Unis ou en Australie. Cette ville atteint un rayon compris entre 20 et 30km et la densité moyenne décroît. Enfin, à partir du milieu du XXe siècle apparaissent les "automobile city". Ces villes sont peu denses et ont un rayon de 40 à 50km. Selon Glaeser and Kahn (2004), la voiture a non seulement réduit les temps de parcours mais aussi permis de se détacher des infrastructures de transports telles que les gares et réduire ainsi les effets d'agglomération liés à la proximité des gares. La plupart des villes, du fait de leur évolution, sont un mélange de ces trois types. La période à laquelle elles ont émergées est cependant déterminante dans leur profil de densité actuel.

Certaines villes semblent néanmoins échapper à cette chronologie. On peut penser aux villes asiatiques qui affichent des records de densité alors que leur développement économique est plus récent (Shanghai atteint une densité moyenne de 300 hab/hectare quand la grande couronne de Paris affiche 85hab/hectare). Bertaud (2001) propose comme explication l'utilisation du vélo comme principal moyen de déplacement à Shanghai, ainsi que la construction de logements en ville beaucoup plus récente (1980), dans ce pays auparavant tourné vers le développement des espaces ruraux (1950-1970) et où le marché de la construction est réglementé par l'Etat. Enfin, dans la plupart des villes asiatiques le développement économique, très rapide, n'a pas laissé le temps aux infrastructures (routes et transports en commun) de se développer (Barter, 2000).

Les trois types de villes décrits plus haut reposent sur une contrainte de temps de transport. Cette contrainte est au centre de la relation entre forme urbaine, volume et mode de transport.

Cette contrainte, autour d'une heure de transport par jour, est constante à travers les lieux (notamment les villes) et le temps. C'est ce que Zahavi and Talvitie (1980) et Marchetti (1994) montrent dans leurs analyses, confirmées par un travail plus récent de Schafer (2000). Ainsi, la forme urbaine peut être expliquée par un budget temps limité et la vitesse des moyens de transports disponibles.

...Et inversement

La dépendance entre forme de la ville et réseau de transport développé fonctionne dans les deux sens. En effet, le développement d'un réseau de transport en commun va dépendre de la forme de la ville. Bertaud (2003) prend l'exemple des villes d'Atlanta et de Barcelone en 1990 (fig.1.8), qui abritent le même nombre d'habitants mais n'ont pas du tout le même profil de densité. Atlanta a une surface urbanisée plus grande et une densité plus faible. Elle ne dispose pas d'un réseau de transport en commun aussi long que Barcelone et si elle voulait offrir la même accessibilité aux transports que Barcelone, il lui faudrait 3400km de ligne (au lieu des 99km présents). Cela représente un investissement par habitant bien trop élevé et des émissions par passager transporté plus élevées que dans les villes denses, du fait d'un taux de remplissage moindre.

Il y a donc deux mécanismes imbriqués qui impliquent deux visions différentes des actions à mener pour réduire les émissions des transports en ville. D'un côté on peut vouloir encourager la densification de la ville pour pouvoir permettre l'introduction d'un réseau de transport en commun efficace, ainsi que la réduction des distances parcourues. Cette vision s'accorde avec l'idée que c'est la forme urbaine qui dicte les modes de transports dominants (Bertaud, 2002a) et cela d'autant plus que le bâti dans les villes est inerte. D'un autre côté, on peut vouloir introduire un réseau de transport en commun efficace pour encourager la densification de la ville dans la mesure où l'activité et donc la ville se développe autour de son réseau de transport (Waddell et al., 2007).

C'est par exemple, dans cette dernière optique que les projets de lignes de transport du Grand Paris ont en partie eu lieu. Un des volets de ces projets concerne les transports en commun comme support au développement local via la création de nouvelles dynamiques locales. Cependant, ces projets de transports s'accompagnent d'autres volets de développement (économie, habitat, enseignement, sport...).

C'est aussi ce dernier mécanisme que les politiques de "transit oriented development" (TOD) des vingt dernières années ont essayé d'actionner en tentant de faire évoluer la forme urbaine en réponse au développement de réseaux de transport en commun (voir section suivante).

Il est évident que ces deux mécanismes jouent conjointement et que si la ville se développe autour des modes de transport les plus efficaces à une période donnée, les modes de transports efficaces à une période ultérieure se trouvent ensuite contraints par la forme urbaine existante.

The Built-up Area of Atlanta and Barcelona Represented at the Same Scale

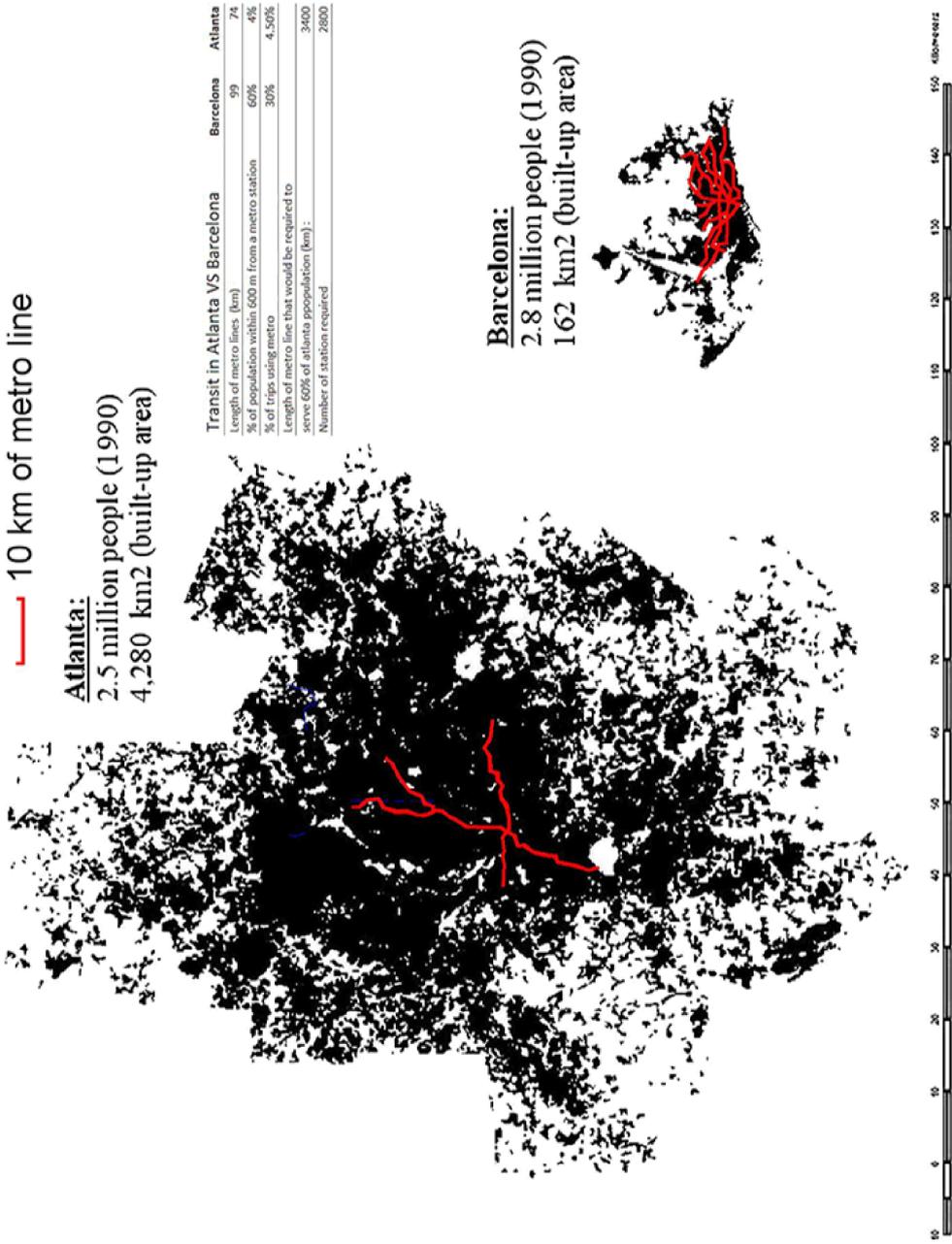


FIGURE 1.8 – Aire urbaine et réseau de transport de Barcelone et Atlanta (source : A.Bertaud, 2003)

Exemples de projets ou de politiques mis en place sur ce levier

Le TOD essaye de mettre en place des contraintes d'urbanisation autour des lignes de transports en commun pour encourager la densification et accélérer le développement de la ville autour de ce moyen de transport. L'objectif principal est de réduire les distances de déplacement et d'encourager l'utilisation des transports collectifs ou non motorisés.

A Curitiba, le réseau de bus rapide a été développé autour de grands axes, dans l'objectif d'influencer la forme urbaine. La politique a porté ses fruits, la population et les activités se concentrent autour des axes de transports en commun (Cervero, 1998; Duarte and Ultramari, 2011). En comparaison avec une ville brésilienne de taille et densité moyenne équivalente comme Brasilia, on constate qu'à Curitiba, deux fois moins de kilomètres sont effectués en voiture et les émissions associées aux transports sont deux fois moindre (Curtis et al., 2009).

Portland est connue pour avoir le programme de TOD le plus large des Etats Unis sur les 25 dernières années via, par exemple, la mise en place de lignes de métro.

D'autres villes à travers le monde se sont tournées vers des politiques de TOD avec plus ou moins de succès (IPCC et al., 2014a). Cervero (1998) fournit des études de cas sur une douzaine de grandes villes à travers le monde qu'il classe en quatre groupes. Les villes adaptatives ont investi dans les transports en commun pour guider la croissance urbaine vers la densification (Stockholm, Copenhague, Tokyo et Singapour). Certaines villes développent les transports en commun alors que celles-ci sont déjà étalées, les transports utilisés sont alors souvent innovants, comme les bus guidés sur rail pour accélérer le transport sur les longues distances ou encore les minibus à la demande, qui permettent de partager les trajets avec d'autres utilisateurs (Adelaide, Mexico). D'autres villes ont concentré leur réseau de transport en commun dans le centre, notamment avec des lignes de tramways et des centres piétons (Melbourne, Zurich). Enfin, la dernière classe est hybride et regroupe les villes qui ont établi un réseau de transport pour encourager la densification et ont aussi mis en place des moyens de desservir les zones moins denses en périphérie (Curitiba, Ottawa, Munich).

Mais ces politiques ne sont pas un succès dans toutes les villes. En effet, les villes sont inertes, elles ne se détruisent pas : Bertaud (2003) calcule qu'à Atlanta, même en supposant un accroissement constant de la population pendant 20 ans accompagné d'une interdiction de construire en dehors des limites actuelles de la ville, il faudrait détruire les 2/3 de la ville pour atteindre la densité limite de 30hab/ha qui permettrait selon Newman and Kenworthy (2006) de rendre les transports publics efficaces.

D'autres politiques ciblent plus directement le choix modal des consommateurs en essayant de désinciter à l'utilisation de la voiture. Au niveau local, cer-

taines villes ont mis en place des péages urbains afin de limiter la congestion et d'inciter les conducteurs à utiliser d'autres modes de transport.

Enfin, certains argumentent en faveur de politiques "douces" s'appuyant sur des stratégies tournées vers la modification des comportements qui seraient moins coûteuses et plus acceptables. Ces mesures passent par des campagnes informatives, sur les mobilités alternatives aux voitures, voir même sur les alternatives aux déplacements (achat en lignes, télétravail...).

L'efficacité de ces mesures sur la réductions de l'utilisation de la voiture est discutée (Moser and Bamberg, 2008; Graham-Rowe et al., 2011; Gardner and Abraham, 2008). Cependant, ces mesures s'insèrent la plupart du temps dans des projets plus larges et ne peuvent être pleinement efficaces que si elles sont accompagnées de politiques sur les infrastructures. Par exemple, la promotion de l'utilisation du vélo est plus efficace si elle s'accompagne du déploiement des pistes cyclables dans la ville.

Ville compacte et eco-city

Quelque soit le sens du lien causal entre densification et réduction de l'utilisation de la voiture, la compacité de la ville semble être un argument en faveur de la réduction des émissions liées aux transports (Banister, 2008; Creutzig et al., 2012). Les mesures de restriction à l'étalement urbain ou d'encouragement à la densité, et le développement des villes orientées vers des déplacements autres que la voiture, sont au centre des projets visant à diminuer ces émissions. Plus largement, ces mesures font partie des stratégies élaborées pour rendre les villes soutenables (Jabareen, 2006).

Cependant, la ville compacte est critiquée sur certains aspects tels que l'augmentation des loyers et des prix de l'immobilier (Quigley and Raphael, 2005; Glaeser et al., 2006), ou encore la congestion automobile qui augmente les émissions d'un véhicule par rapport à une circulation fluide sur un même trajet (Gordon and Richardson, 1997). Pour ces raisons, certains auteurs se posent la question de l'acceptabilité de ces mesures visant à densifier les villes (Breheny, 1997) et soulignent la préférence des ménages pour l'habitat individuel et le véhicule privé.

D'autres, tempèrent le lien entre densité et trafic en voiture (Cervero and Kockelman, 1997). Ewing and Cervero (2010) montrent avec une meta-analyse que la densité semble faiblement corrélée aux véhicules-kilomètres dans les villes à travers le monde. La densité serait alors un proxy pour d'autres variables plus significatives, comme la mixité des activités et la situation centrale, qui permettent de réduire les trajets.

Enfin, Gaigné et al. (2012) montrent qu'une ville polycentrique avec décentralisation des emplois, encourageant l'étalement urbain, n'est pas forcément plus mauvaise en terme d'émissions qu'une ville dense et monocentrique, à moins que

les habitants de ce dernier type de ville n'adoptent en masse les transports en commun.

La ville dense n'est pas l'unique solution envisagée pour faire réduire les émissions du transport, certains proposent d'encourager le polycentrisme pour créer des pôles connectés entre eux. Cette vision de la forme urbaine s'appuie souvent sur le développement de technologies peu émettrices (Gordon and Richardson, 1997). Le terme "eco-city" est employé pour désigner ces villes tournées vers le déploiement des nouvelles technologies peu émettrices (panneaux solaires, habitat à énergie positives, véhicules électriques...) dans l'optique de rendre les villes soutenables, sans considérations particulières pour l'étalement urbain et la compacité de la ville (Jabareen, 2006).

La technologie comme levier pour réduire les émissions, via la réduction de l'intensité énergétique ou CO₂ des modes de déplacements actuels, inclut notamment les véhicules électriques comme nous allons le détailler plus loin.

1.4 Le levier technologique

1.4.1 Technologies des véhicules privés peu émetteurs

Il existe différents types de technologies peu ou pas émettrices pour les voitures. Les analyses de cycle de vie, qui calculent l'ensemble des émissions liées à la fabrication du véhicule, à celle de son carburant et à son utilisation nous permettent de comparer le potentiel de ces différentes technologies.

La première option, sur laquelle les constructeurs travaillent déjà depuis longtemps, concerne l'amélioration du moteur à essence ou diesel existant. Des moteurs très efficaces ont déjà fait leur apparition, avec des véhicules consommant 3l/100km selon l'ADEME en 2015. Le GIEC estime que le potentiel de réduction d'émissions au kilomètre à l'horizon 2030 est de l'ordre de 50% avec un coût societal très faible (IPCC et al., 2014b). Cependant cette tendance ne peut être infinie et les progrès concernent surtout les petits véhicules qui sont allégés et moins puissants.

Les biocarburants, produits à partir d'huile végétale ou de canne à sucre, ont l'avantage de pouvoir être introduits en petites quantités (5%) dans des véhicules à combustion interne, sans avoir à modifier les moteurs. Avec de légères modifications des moteurs, le ratio peut monter jusqu'à 85%. Mais les biocarburants sont moins denses en énergie (35% en moins) que l'essence ou le diesel, l'autonomie des voitures serait donc réduite à volume de carburant constant.

Néanmoins, l'énergie utilisée pour raffiner ces biocarburants est souvent émettrice. De plus, leur production pourrait entrer en conflit avec la production de nourriture, en s'appropriant les terres agricoles (IPCC et al., 2014b). Selon que l'on

utilise des déchets ou des terres abandonnées ou bien que l'on utilise les forêts ou les terres agricoles productives, les biocarburants pourraient respectivement réduire les émissions ou émettre jusqu'à 470 fois plus de CO₂ que ce qu'ils permettent d'économiser dans les moteurs (Fargione et al., 2008; Searchinger et al., 2008). Enfin le coût des biocarburants est plus élevé que celui des énergies fossiles (Chapman, 2007).

Les véhicules au gaz naturel (méthane) sont une autre alternative. Ces véhicules permettent de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 25% ou 30% par rapport à une voiture essence et n'émettent presque pas de particules ou d'oxydes d'azote (Lave et al., 2000; IPCC et al., 2014b). La structure du véhicule est peu modifiée par rapport au véhicule à combustion. Cependant ces véhicules ne sont pas entièrement propres et reposent sur un carburant fossile.

Il existe également différents types de véhicules électrifiés, selon la manière dont celui-ci est alimenté en électricité (Chan, 2007). Les véhicules hybrides, fonctionnent avec deux moteurs, un moteur à combustion et un moteur électrique qui vient remplacer ou assister le moteur à combustion selon le type de véhicule. Les "full hybrid" sont des véhicules dans lesquels la batterie du moteur électrique est rechargée par le moteur thermique et par récupération de l'énergie cinétique au freinage. Les "plug-in hybrid", ou hybrides rechargeables, ont un moteur électrique que l'on peut recharger sur le réseau, permettant ainsi de l'utiliser comme une voiture toute électrique quand la batterie est chargée.

L'hybride offre l'avantage d'utiliser chaque moteur sur la plage de fonctionnement où il est le plus efficace. Le moteur électrique est généralement réservé au démarrage et pour des vitesses inférieures à 50km/h, le moteur thermique prend ensuite le relai. Les véhicules rechargeables offrent aussi la possibilité de ne rouler qu'en électrique. Pour de très fortes accélérations, les deux moteurs peuvent fonctionner simultanément. Cependant les véhicules hybrides sont une solution coûteuse, car il s'agit de construire et d'entretenir deux moteurs avec des technologies différentes. De plus, cette technologie reste en partie dépendante du pétrole et est donc émettrice.

Le véhicule tout électrique fonctionne avec l'électricité stockée dans ses batteries. Le moteur électrique offre l'avantage d'être beaucoup plus efficace en énergie que le véhicule avec moteur à combustion (90% de l'énergie utilisée sert à déplacer le véhicule, alors que le moteur à combustion n'offre que 25% de rendement).

Selon la source de production de l'électricité, ces véhicules peuvent atteindre des niveaux d'émissions de CO₂ très faibles (Kromer, 2007). Le GIEC estime que si le mix électrique reste intensif en carbone (600gCO₂eq/kWh) le véhicule électrique ne permet de diminuer que très peu les émissions et à un coût très élevé à l'horizon 2030. Mais si l'intensité carbone de l'électricité atteint 200 gCO₂eq/kWh et le coût des batteries diminue, le véhicule électrique offre le potentiel de réduction le plus élevé de toutes les technologies et à un coût inférieur

à 100 dollars la tonne de CO₂ (IPCC et al., 2014b). Dans la section 1.4.3, nous reviendrons sur le débat sur les émissions du puits à la roue et les analyses de cycle de vie du véhicule électrique.

Cependant, même si la capacité et le poids des batteries des véhicules électrifiés ne cessent de s'améliorer, ceux-ci n'offrent pas une autonomie comparable à celle des autres véhicules. De plus, le temps de recharge est encore long (entre 30min et 12h, selon les bornes de recharge et la taille de la batterie).

Enfin, les véhicules électriques avec pile à combustible, encore peu avancés technologiquement, utilisent l'hydrogène pour générer de l'électricité. Ces véhicules n'émettent pas de gaz à effet de serre. Cependant, la production d'hydrogène, pour être efficace énergétiquement, est encore polluante en l'état actuel de la technologie (à partir du gaz naturel, du charbon ou de la biomasse). Les infrastructures nécessaires à sa production sont encore inexistantes et son coût est plus élevé que celui des carburants traditionnels. Les analyses de cycles de vie donnent des résultats très différents selon les technologies de production étudiées. Les émissions associées à la production d'hydrogène varient du simple au triple selon que celle-ci s'appuie sur le gaz naturel ou l'électrolyse (mix électrique américain) (MacLean and Lave, 2003).

Les potentiels de réduction de chaque technologie et leur coût pour la société sont précisés dans le graphique 1.9 issu des analyses du GIEC.

Plusieurs analyses soulignent que la réduction des émissions dans les transports privés ne s'appuiera pas sur une unique technologie. Il n'y aura probablement pas de scénario "silver bullet", où une seule technologie permettra de réduire suffisamment les émissions (Grimes-Casey et al., 2008; McCollum and Yang, 2009).

L'électrification des véhicules connaît toutefois un regain d'intérêt et est souvent mentionné dans les options envisageables pour réduire les émissions. La plupart des constructeurs automobiles proposent aujourd'hui un modèle de véhicule électrique ou projettent d'en proposer. De plus, les ventes de voitures électriques augmentent chaque année depuis cinq ans comme le montre le graphique 1.10.

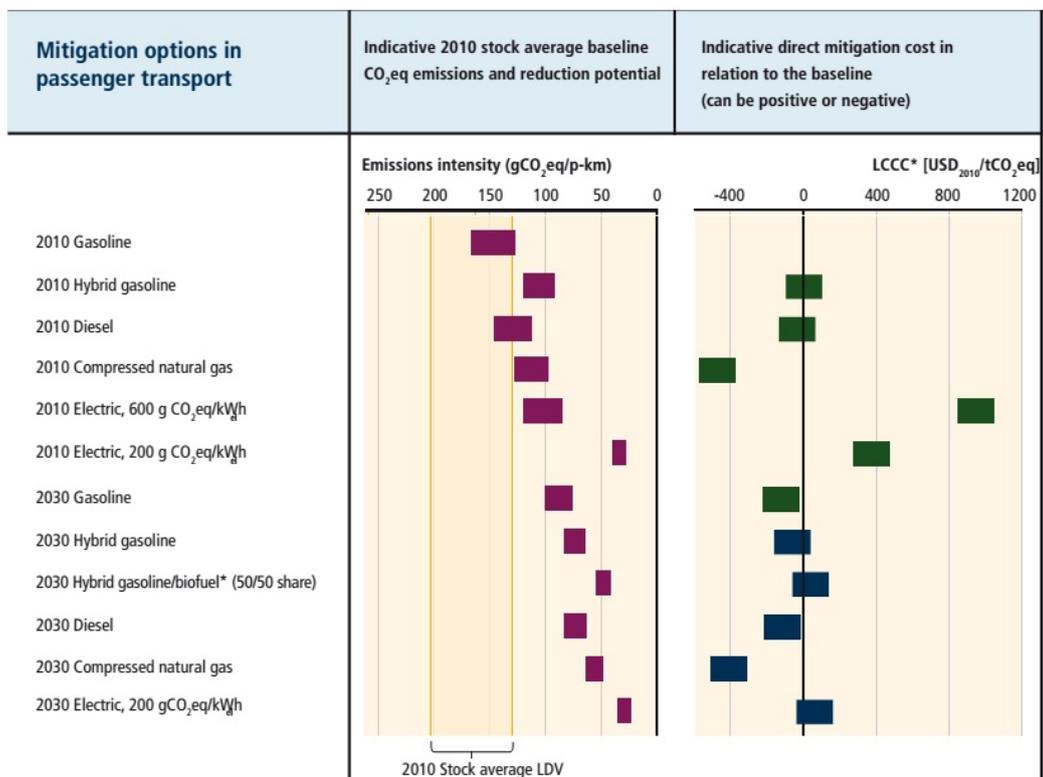


FIGURE 1.9 – Évolution des émissions de CO₂ à l’horizon 2030 pour différentes technologies et leur coût pour la société (Source : IPCC et al, 2014b)

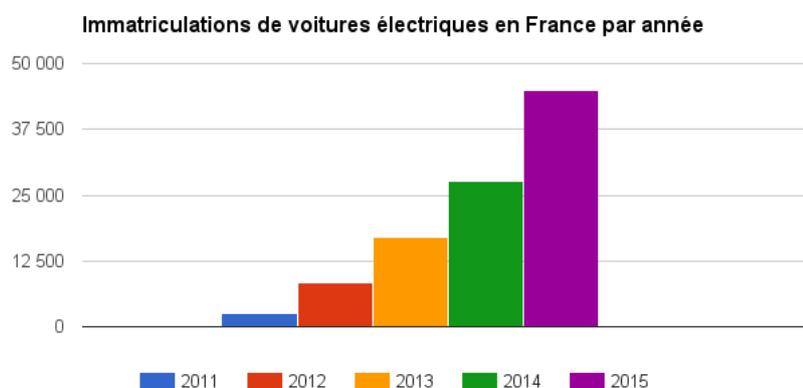


FIGURE 1.10 – Immatriculation des voitures électriques en France depuis 2011 (Source : automobile-propre.com)

La suite de cette thèse se concentre donc sur le véhicule électrifié et plus précisément sur le véhicule électrique, car le véhicule hybride offre un potentiel de décarbonisation moindre et une rupture technologique moins franche. Le véhicule électrique offre un fort potentiel de réduction des émissions dans les régions où l'électricité est décarbonée comme la France.

1.4.2 Histoire du véhicule électrique

La voiture électrique est apparue à la fin du 19ème siècle en même temps que la voiture avec moteur thermique ou encore la voiture à vapeur. Entre 1885 et 1905, les trois technologies sont restées en compétition, la voiture électrique ayant un léger avantage en terme de diffusion.

Au début du siècle, la recherche sur les batteries a permis de doubler leur capacité en 10 ans (10Wh/kg dans les années 1890 et 18Wh/kg en 1901). Le moteur électrique semblait la technologie la plus prometteuse : en 1900 la Jamais Contente atteignait les 100km/h. Puis, des erreurs de stratégie marketing ont permis aux constructeurs de moteurs thermiques de prendre le dessus sur le marché. Les constructeurs de voitures thermiques se sont en effet engouffrés sur le segment des produits bon marché et dans la production de masse, quand les véhicules électriques étaient destinés à des consommateurs très aisés et pariaient sur une technologie de pointe, produite à petite échelle (Cowan and Hultén, 1996).

Puis, avec l'invention du démarrage par allumage électrique pour les voitures thermiques, au moment même où les ventes commençaient à prendre le dessus sur les autres technologies, les fabricants de batteries ont délaissé la recherche sur

l'amélioration de la capacité et se sont tournés vers la production de masse de petites batteries pour le moteur à combustion.

Ainsi en quelques dizaines d'années, l'industrie automobile s'est trouvée dans une situation de lock-in autour du véhicule thermique. La filière bénéficie de rendements d'échelle croissants, grâce à des économies d'échelle dans la production ou encore des effets d'apprentissage. Cowan and Hultén (1996) expliquent cette situation par les différents sentiers de dépendance au sein de la filière automobile (la R&D étant orientée vers le moteur thermique).

Ces dépendances se retrouvent aussi entre les filières industrielles (synergies des techniques et des progrès, effet réseau). La filière automobile est, par exemple, en partie dépendante du secteur énergétique (Grübler et al., 1999). Grübler et al. (1999) insistent aussi sur l'effet des infrastructures et des réseaux dans les situations de lock-in. Par exemple, la diffusion d'un réseau de pompe à essence à large échelle a définitivement écarté le véhicule électrique de la compétition comme moyen de transport.

Mais c'est aussi ce sentier interdépendant des filières industrielles qui a permis depuis une vingtaine d'années au moteur électrique de revenir sur le devant de la scène. En effet, les recherches sur l'amélioration des batteries dans l'électronique (ordinateurs, téléphones...) ont bénéficié aux progrès sur le véhicule électrique en permettant l'utilisation de batteries à 150-200Wh/kg (batteries Li-ion).

Aujourd'hui, les technologies électriques et thermiques ne sont pas encore en compétition. Nous sommes dans une situation de lock-in technologique. Si nous considérons qu'il serait souhaitable de pouvoir en sortir, la question est alors de savoir comment. Cowan and Hultén (1996) distinguent six facteurs permettant de sortir d'un lock-in technologique :

- Crise dans la technologie établie
- Régulation institutionnelle
- Avancée technologique significative
- Changement dans les goûts et comportements
- Marché de niche, "early adopters"
- Résultats scientifiques

Plusieurs de ces facteurs permettant de sortir des lock-in sont aujourd'hui présents ou en développement. Par exemple, les normes sur les émissions, les progrès sur les batteries, la prise de conscience des consommateurs de l'impact de nos modes de vie sur le changement climatique sont des facteurs qui influencent le regain d'intérêt pour le véhicule électrique. Les efforts amorcés pour adapter

les infrastructures à l'utilisation du véhicule électrique, permettrait d'initier un nouveau réseau de recharge (voir section 1.4.5). Ces facteurs ne sont pas indépendants, leur présence simultanée est un indicateur potentiel d'un possible retour du moteur électrique. Enfin le dernier facteur, concernant les résultats scientifiques comme outil pour mieux mesurer le potentiel et les impacts d'une technologie alternative, donne une portée pratique au travail de prospective fourni dans cette thèse. Il permet d'imaginer à long terme, les conséquences d'un retour à grande échelle du véhicule électrique et éventuellement d'influencer certains des cinq autres facteurs. Il permet aussi de justifier les investissements favorisant la sortie d'un lock-in technologique.

1.4.3 La technologie actuelle

Le véhicule électrique représente 665 000 véhicules dans le monde en 2015, soit 0.08% des véhicules en circulation (Energy Information Agency, 2015).

La Norvège est le pays qui compte le plus de véhicule électrifiés dans son parc : 70 000 véhicules électriques et 10 000 véhicules hybrides. En 2015, en Norvège, une voiture vendue sur cinq était électrique.

En France, on compte aujourd'hui 45 000 véhicules hybrides et électriques, soit 0,1% du stock (CEREMA, 2016).

France : immatriculations de voitures particulières par type d'énergie				
	3 mois 2014		3 mois 2015	
	Unités	%	Unités	%
Diesel	290 675	65,08	280 745	58,82
Essence	142 359	31,88	178 544	37,41
Hybride (électricité + essence)	8 675	1,94	10 721	2,25
Hybride (électricité + gazole)	2 816	0,63	3 803	0,80
Electricité	1 533	0,34	2 903	0,61
Bicarburant : essence + GPL	481	0,11	531	0,11
Superéthanol	58	0,01	47	0,01
Bicarburant : essence + GNV	5	0,00	6	0,00
GNV	4	0,00	19	0,00

FIGURE 1.11 – Part de marché des différentes motorisations en France au premier trimestre 2014 et 2015 (Source : CCFA, 2014)

La figure 1.11 détaille les parts de marché dans les ventes pour le premier trimestre de 2015 et de 2014 pour chacune des technologies en France. Nous re-

marquons que, parmi les technologies alternatives au moteur thermique, seules les voitures hybrides et électriques semblent trouver un intérêt auprès des consommateurs, leurs parts ayant augmentées entre 2014 et 2015.

Aujourd'hui, la voiture électrique est alimentée par des batteries entre 15kWh et 30kWh en moyenne permettant de faire entre 150 et 200km (400km pour la Zoé et la Tesla S avec respectivement 40 et 50kWh de batteries). Les batteries les plus répandues actuellement sont les batteries lithium-ion qui offrent une densité énergétique de 150Wh/kg. Pour offrir l'autonomie donnée ci-dessus, le pack de batterie pèse donc environ 150kg. D'autres types de batteries sont étudiées, par exemple les batteries lithium-soufre (2600Wh/kg) ou aluminium-air (8000Wh/kg) qui permettraient, à poids du pack constant, d'augmenter considérablement l'autonomie. Les industriels parient déjà sur des batteries lithium-ion plus denses en énergie et moins coûteuses à l'horizon 2020.

Le prix de batteries lithium-ion a été divisé par deux depuis 2010. Les batteries lithium-ion ont actuellement un coût d'environ 500 euros le kWh. Mais les projections pour les dix années à venir présentent un coût de la batterie lithium-ion aux alentours de 300 euros le kWh en 2020 (voir section suivante).

Les investissements à grande échelle commencent à voir le jour, Tesla et Panasonic ont annoncé, par exemple, l'ouverture d'une usine de batteries qui devrait doubler la production mondiale de batteries pour les voitures électriques.

Les recherches actuelles sur les supercondensateurs (notamment à base de nano matériaux comme le graphène) laissent envisager une substitution ou une complémentarité avec les batteries classiques à moyen terme. Ceux-ci permettraient de stocker autant d'énergie que les batteries actuelles tout en ayant une recharge ultra rapide (quelques minutes), à un prix compétitif avec les batteries actuelles.

L'impact environnemental de la production des batteries Li-ion, utilisées par les véhicules électriques, est relativement faible en comparaison des émissions liées à l'usage des véhicules. L'extraction des métaux nécessaires à la fabrication des cathodes et anodes est une activité émettrice, mais celle-ci pèse relativement peu par rapport au niveau d'émissions liée à l'usage (Notter et al., 2010). L'impact environnemental de la fin de vie des batteries est encore incertain. Le recyclage des batteries est peu répandu : aujourd'hui 5% des batteries et accumulateurs au lithium sont recyclés en Europe. La séparation entre les différents matériaux pose encore des problèmes. Cependant, la législation européenne impose à tout fournisseur de batterie de s'assurer de la collecte et du recyclage. Les constructeurs automobiles conçoivent donc des filières de recyclages pour leur batteries.

Concernant l'intensité CO₂ du véhicule électrique, celle-ci est très dépendante du mix énergétique utilisé pour la production d'électricité. Son efficacité en terme de potentiel de réduction d'émissions à été très discutée, notamment à l'aide d'analyses de cycle de vie (Hawkins et al., 2013). En effet, si les émissions

Car type	Fuel utilization stage	Total
	GHG emissions per 100 km of vehicle travel (kg per 100 km)	GHG emissions per 100 km of vehicle travel ^a (kg per 100 km)
Conventional	19.9	21.4
Hybrid	11.6	13.3
1 ^b		
Electric	0.343	2.31
Fuel cell	10.2	14.2
2		
Electric	5.21	7.18
Fuel cell	10.6	14.7
3		
Electric	10.1	12.0
Fuel cell	11.1	15.2

^a During vehicle life time (10 years), an average car drives 241,350 km [6].

^b Numbers in this column denote scenario for electricity production.

FIGURE 1.12 – Comparaison des émissions au cours du cycle de vie de quatre technologies de véhicules pour différents scénarios de production d'électricité. (Source : Granovskii et Rosen, 2005)

directes du véhicule en service sont nulles, les émissions liées à la production de l'électricité et des batteries, ainsi que celles liées à la fin de vie du véhicule sont élevées dans certaines régions. Granovskii et al. (2006) montrent par exemple que selon que le scénario de production d'électricité soit 100% renouvelable (1), 100% au gaz (3) ou un mix des deux (2), le potentiel d'émissions du véhicule électrique diffère (Figure 1.12). Le potentiel de réduction d'émissions par rapport à un véhicule thermique peut même être négatif pour les mix électriques à base de charbon (IPCC et al., 2014b).

La distance parcourue au cours du cycle de vie du véhicule électrique est aussi essentielle dans la comparaison entre les technologies. ? précisent par exemple, dans leur analyse du cycle de vie que les émissions évitées par le véhicule électrique utilisant le mix électrique européen, par rapport au véhicule essence, passe de 27% à 9% quand la distance parcourue passe de 200 000 à 100 000 km.

Nous pouvons voir aussi par exemple, sur la figure 1.13b, qu'un véhicule électrique se chargeant sur le réseau allemand doit rouler plus longtemps (75 000 km) que le véhicule français (25 000 km) avant de rattraper les émissions du véhicule diesel.

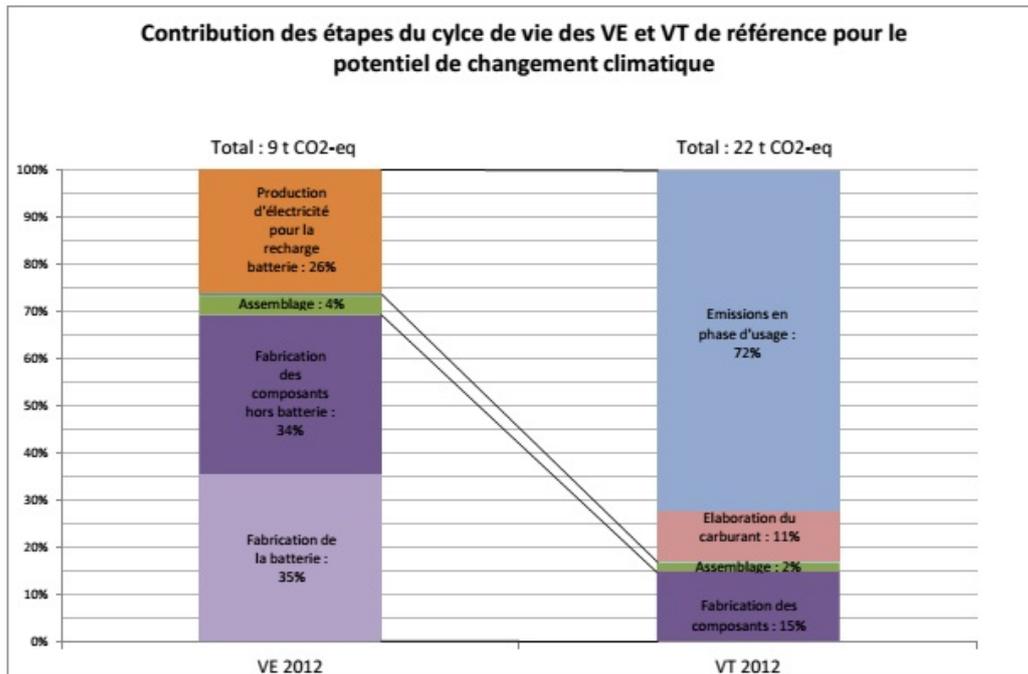
En effet en France, la production d'électricité étant peu émettrice, les émissions en phase d'utilisation sont faibles. La figure 1.13a montre les émissions des véhicules thermiques et électriques calculées par l'ADEME en 2012, tout au long de leur cycle de vie en France. Nous remarquons que le véhicule électrique émet beaucoup moins que le véhicule thermique, notamment en phase d'utilisation. En effet, selon ce graphique les émissions liées à la construction et à la fin de vie des deux types de véhicules sont identiques.

De plus, au delà des variations régionales sur les émissions moyennes de la production moyenne d'électricité, les variations temporelles influencent aussi les résultats des analyses de cycles de vie. Selon la période de la journée où seront rechargés les véhicules, les émissions marginales du système électrique ne seront pas les mêmes (Tamayao et al., 2015), car les sources énergétiques diffèrent selon le volume produit.

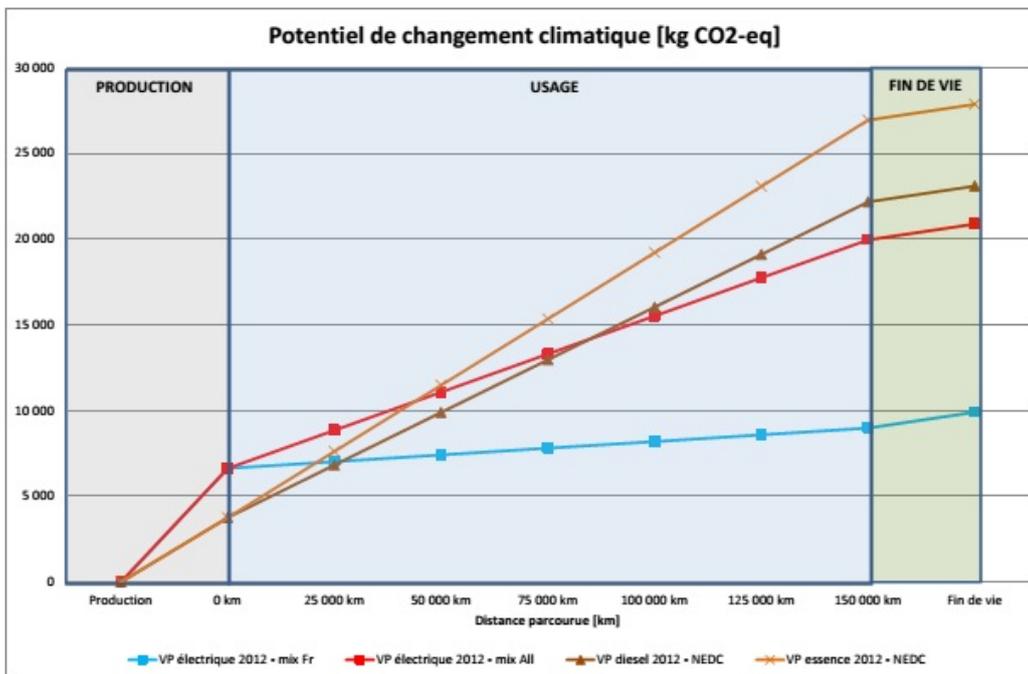
1.4.4 Scénarios sur les conditions de déploiement du véhicule électrique

Pour McCollum et al. (2014) et Bosetti and Longden (2013) l'électrification des véhicules est nécessaire à la réduction de gaz à effet de serre et au maintien de leur concentration en dessous de 450ppm.

En compilant l'ensemble des objectifs annoncés en 2012 par les pays dans le monde, l'AIE estime qu'il devrait y avoir 6 millions de ventes à l'horizon 2020, portant ainsi le stock de véhicule électrique dans le monde à 20 millions (figure 1.14) (IEA, 2012).



(a) Émissions lors du cycle de vie du véhicule thermique et du véhicule électrique pour 150 000km



(b) Émissions lors du cycle de vie en fonction du kilométrage accumulé pour le véhicule thermique et électrique en France et en Allemagne

FIGURE 1.13 – Comparaison des émissions lors du cycle de vie du véhicule électrique et thermique (Source : ADEME, 2012)

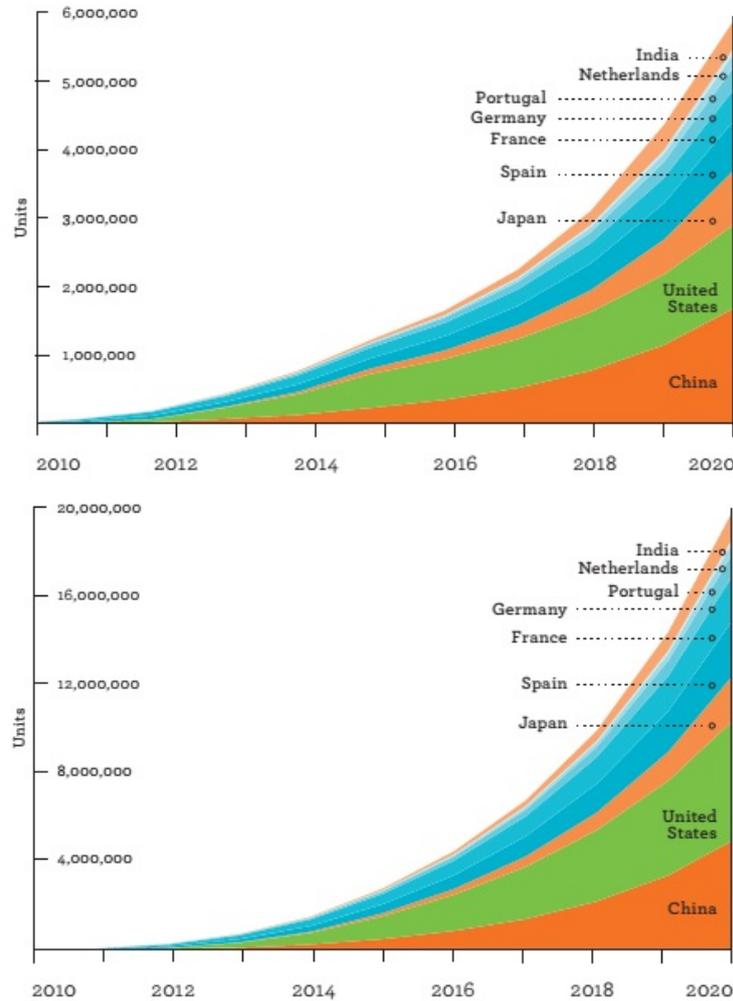


FIGURE 1.14 – Objectifs de ventes (en haut) des gouvernement à travers le monde et stocks de véhicule électrique induit (en bas) (Source : IEA, 2013)

Les scénarios de déploiement du véhicule électrique de l’AIE considèrent que 50% des ventes mondiales seront des véhicules électrifiés à l’horizon 2050 (IEA, 2011). Ce scénario implique un engagement de la part des États et des industries.

Pasaoglu et al. (2014) font une revue des études sur la potentielle pénétration du véhicule électrique sur le marché européen dans laquelle ils montrent que les projections se situent entre 3 et 25% des parts de marchés.

Pour voir le véhicule électrique se déployer à grande échelle, plusieurs améliorations de la technologie sont encore à mettre en oeuvre.

Nous avons vu auparavant, qu'une condition essentielle à l'efficacité du véhicule électrique, en terme de réduction d'émissions, est la baisse du contenu carbone de la production d'électricité. Cependant, de nombreuses études s'accordent à montrer que le secteur électrique est celui dans lequel les réductions d'émissions sont les moins coûteuses (Yeh et al., 2008; Williams et al., 2012). La plupart des scénarios sur le potentiel déploiement du véhicule électrique s'appuient sur de faibles émissions du secteur électrique dans le futur, rendant ainsi les analyses de cycle de vie favorables au véhicule électrique.

Ce déploiement du véhicule électrique repose aussi sur la baisse de son coût (Thiel et al., 2010; Markel and Simpson, 2006). Concernant le coût de la batterie, la plupart des scénarios s'accordent autour d'un kWh à 300 dollars environ à l'horizon 2020 (Cambridge Econometrics and Ricardo-AEA, 2013; Catenacci et al., 2013). McKinsey and Company (2010), en s'appuyant sur les estimations de nombreux constructeurs automobiles, prévoient une baisse moyenne de 75% du prix du kWh entre 2010 et 2020 (Figure 1.15). Ces diminutions de coût pourraient résulter notamment des progrès de la recherche et des économies d'échelle sur la fabrication à mesure que la demande augmenterait (Anderson, 2009). L'ampleur de la diminution des coûts est cependant difficile à prévoir et l'incertitude reste présente dans ces estimations comme nous le voyons sur la figure 1.15, qui ne donne que des fourchettes d'estimations.

Enfin, les améliorations concernant l'autonomie du véhicule sont essentielles pour rassurer les utilisateurs (Tran et al., 2012). Actuellement, les perspectives d'amélioration envisagées résident, comme nous l'avons vu dans la section précédente, dans le développement des supercondensateurs (IPCC et al., 2014b; Burke, 2010), même si leur coût reste encore très élevé (Hadjipaschalis et al., 2009).

La mise en place d'un réseau de recharge est aussi une condition essentielle du dispositif. La plupart des bornes devraient être privées (Ewing et al., 2003) car le domicile des usagers est l'endroit où le véhicule passe le plus de temps. Mais la mise en place de recharges publiques (notamment de recharges rapides) est aussi nécessaire (Nègre and Legrand, 2011).

Enfin, Struben and Sterman (2008) soulignent l'importance de l'effet de seuil dans la diffusion de nouvelles technologies. Au delà d'un certain niveau de part de marché, l'adoption d'une technologie alternative s'accélère. Ils montrent aussi la nécessité des programmes de marketing et de l'action publique pour atteindre le seuil de diffusion au delà duquel les parts de marché du véhicule électrique augmenteront à un rythme auto entretenu.

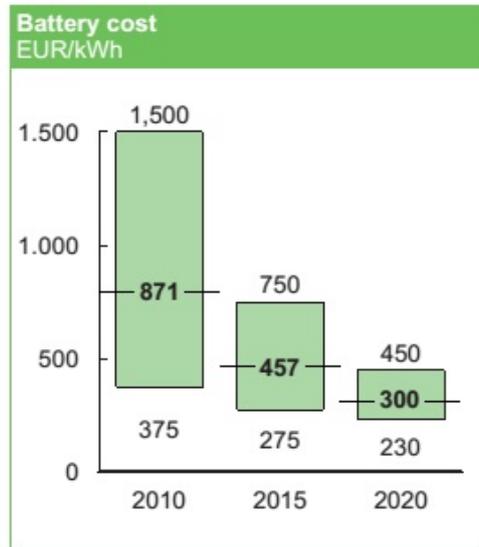


FIGURE 1.15 – Prévisions de prix du kWh des batteries pour le véhicule électrique (Source :McKinsey)

1.4.5 Exemples de projets mis en place sur le levier technologique

Au niveau mondial, l'AIE estime que l'ensemble des dépenses allouées au développement du véhicule électrique entre 2008 et 2012 avoisine les 15 milliards de dollars Energy Information Agency (2013). Ces dépenses sont surtout concentrées sur la R&D, étant donné que cette technologie est encore en début de développement technique (Figure 1.16).

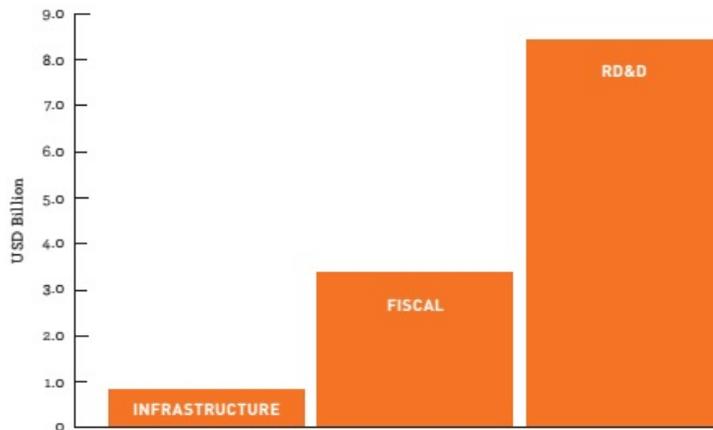


FIGURE 1.16 – Dépenses engagées entre 2008 et 2012 pour le développement du véhicule électrique dans le monde (Source : AIE,2013)

Au delà de ces dépenses directes, les autorités ont déployé des politiques avec pour objectif d'actionner le levier technologique, en réorientant les usagers vers des véhicules plus propres (et parmi eux, les véhicules électriques).

Dans plusieurs régions ou pays (USA, Europe, Chine..), les normes d'émissions imposent à chaque constructeur des moyennes d'émissions sur des cycles d'utilisation (ville, route, autoroute) de leur flotte produite en fonction de leur poids moyen. Les seuils sont régulièrement revus à la baisse afin de contraindre les constructeurs à proposer des véhicules plus propres. En Europe, ces normes existent depuis 2009 et s'élèvent aujourd'hui à 130gCO₂/km en moyenne. Elles ont pour objectif de limiter les émissions à 95gCO₂/km pour les véhicules produits en 2020.

Plus précisément, l'Union Européenne a mis en place des "super-crédits" pour les véhicules émettant moins de 50gCO₂/km, permettant aux constructeurs de comptabiliser ces véhicules de manière plus importante dans la moyenne des émissions des véhicules qu'ils produisent. Les véhicules électriques sont donc proposés par de plus en plus de constructeurs dans la mesure où ceux-ci permettent de faire baisser les moyennes d'émissions. Il convient néanmoins de préciser que cette mesure, qui permet de comptabiliser plus de véhicules propres que ce qui a été produit réellement, permet donc au constructeur de continuer à produire toujours plus de véhicules émetteurs, sans que la moyenne des émissions générées par sa flotte ne soit affectée.

Bento et al. (2015) montrent l'efficacité, en terme de réduction d'émissions, des standards d'émissions au États-Unis, qui ont obligés les constructeurs à inno-

ver pour proposer des véhicules plus propres avec des caractéristiques de confort (taille, poids, puissance) comparables.

L'efficacité, en terme de réduction d'émissions, de cet instrument réglementaire a été comparée à celle de mesures financières comme le bonus-malus, les taxes différenciées à l'achat ou encore une taxation du prix du carburant. Gillingham (2013) montre que les systèmes de bonus-malus et de standards peuvent être équivalents en terme de réduction d'émissions.

Cependant, l'outil réglementaire contraint les constructeurs dans la phase de production, alors que les systèmes financiers contraignent le consommateur dans son choix de véhicule. Les standards d'émissions semblent donc plus facilement acceptables pour la population.

De plus, la faible réaction des consommateurs aux variations de prix, et donc, l'impact limité des taxes sur le carburant sur sa consommation, a été mis en avant par plusieurs études (Greene et al., 2005; Allcott and Wozny, 2013; Ewing and Sarigöllü, 2000; Greene, 1990). Cette faible réaction peut provenir d'une difficulté pour les ménages, à calculer les coûts de fonctionnement du véhicule (Turrentine and Kurani, 2007). Les taxes à l'achat comme le système du bonus malus, offrent un message plus clair et visible pour aider les consommateurs à choisir des véhicules plus propres (Gallagher and Muehlegger, 2011). D'autres montrent que cette réaction (élasticité) a diminuée durant les années 2000 par rapport aux années 1970, à cause d'une plus grande dépendance des ménages à la voiture et de la baisse de la consommation moyenne de carburant (Hughes et al., 2008).

Gillingham et al. (2015) expliquent les divergences d'estimation de l'élasticité du volume de transport au prix de carburant par l'hétérogénéité des véhicules : les véhicules consommant peu ont une élasticité plus faible, l'âge du véhicule entre aussi en jeu et fait varier l'élasticité. Les taxes sur le carburant ne touchent donc pas uniformément les conducteurs.

Enfin pour Creutzig et al. (2011), les instruments monétaires sont essentiels pour prévenir l'effet rebond que peut engendrer les réglementations. L'association des deux instruments semble donc nécessaire (Greene and Plotkin, 2011). West et al. (2015) soulignent cependant que les réglementations encouragent aussi les consommateurs à acheter des véhicules plus petits et moins puissants, ce qui peut contrebalancer l'effet rebond.

L'efficacité des mesures prises en Europe est visible sur le graphique 1.17.

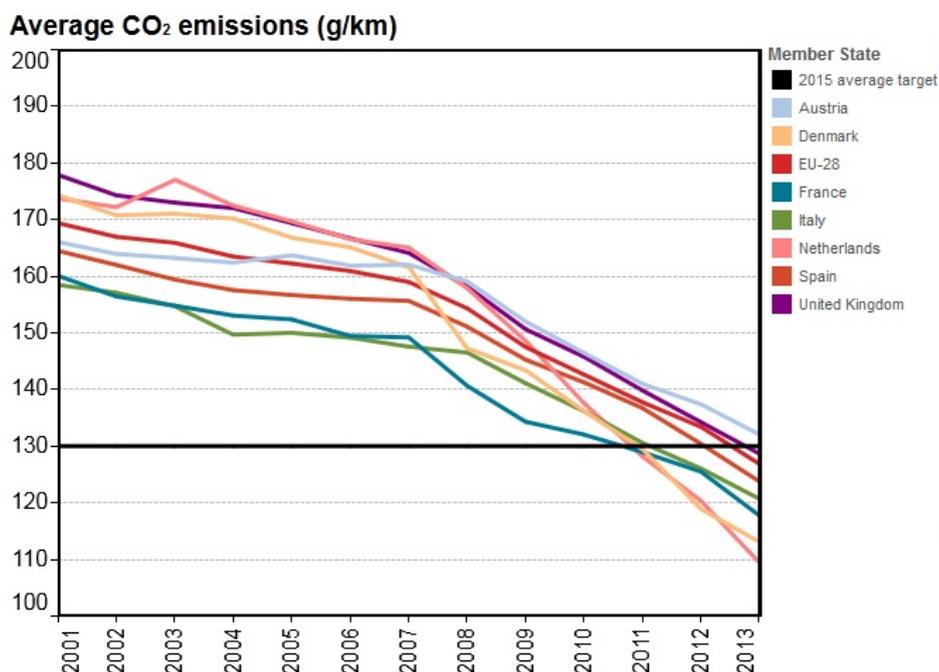


FIGURE 1.17 – Evolution des émissions moyennes dans plusieurs pays d’Europe. (Source : ICCT, 2013)

En France, des politiques visant à réduire les émissions liées aux transports ont été mises en place.

Depuis mai 2006, le gouvernement a mis en place un dispositif d’étiquette CO₂ visant à aider les consommateurs à évaluer l’impact environnemental de leur équipements. Cette information participe aux efforts pour modifier les comportements d’achat des consommateurs, en complément des efforts de sensibilisation au changement climatique.

Parallèlement un système de bonus-malus à l’immatriculation a été mis en place. Le barème réévalué en 2015, offre un bonus de 6300 euros aux acheteur d’un véhicule électrique. Celui-ci s’accompagne d’une majoration à 10 000 euros pour les consommateurs se séparant d’un vieux véhicule diesel.

Récemment, le projet d’eco-pastille a fait surface, sur le modèle des expériences déjà faites dans plusieurs pays européens (Allemagne, Danemark, Suède, Italie, Autriche). Cette pastille est divisée en plusieurs catégories (allant de 1 à 6) en fonction du type de carburant et de l’année de mise en service. Cette pastille devrait permettre de discriminer les conducteurs les jours de pic de pollution en interdisant les plus polluants de conduire durant ces épisodes.

Parmi les politiques déployées, certaines sont spécifiquement dédiées au véhicule électrique.

En 2009, le plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables, envisage plusieurs actions concrètes pour atteindre l'objectif de 2 millions de véhicule électrique et d'atteindre 4,4 millions de points de charge à l'horizon 2020. Parmi ces actions nous pouvons citer la mise en place d'un super bonus, l'installation de prises de recharge dans toutes les nouvelles constructions intégrant un parking ou encore la mise en place d'aide aux collectivités pour l'installation de bornes. La plupart ont été mise en application dans les années suivantes.

En 2010, le Grenelle II de l'environnement prévoit que les véhicules électrifiés représentent 27% du marché à l'horizon 2025. Pour cela, le gouvernement a coordonné un premier achat groupé de 50 000 voitures électriques en 2010. Le gouvernement s'est engagé en 2010 à fournir 10% des besoins en prises de recharge. En 2012, 1250 sites de recharge devaient être installés. Les scénarios du Grenelle II prévoyaient 75 000 point de recharge en 2015 et 400 000 en 2020. Suite au Grenelle II, le décret du 25 juillet 2011 met en oeuvre l'obligation de d'intégrer de prises de recharge dans tous les nouveaux immeubles et parkings. Cependant, en 2014, on compte 10 000 points de recharge publics fonctionnels.

Dans le plan automobile de 2012, l'état s'engageait à acquérir 25% de véhicules électriques ou hybrides parmi les nouveaux achats de véhicules. Cet objectif a été atteint en 2013. Dans la loi sur la transition énergétique de 2014, l'Etat et les établissements publics se sont engagés à posséder 50% de véhicules propres lors du renouvellement de leur flotte.

La loi du 4 aout 2014 sur la transition énergétique prévoit aussi la mise en place d'un crédit d'impôt de 30% pour l'installation d'une borne de recharge (adoptée dans la loi de finances 2015). Les objectifs en matière de points de recharge sont passés à 7 millions en 2030 (publics et privés confondus).

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (2015) réaffirme la volonté de déployer un réseau de recharge suffisant pour l'utilisation des véhicules électrifiés à large échelle. Celle-ci renouvelle l'objectif de 7 millions de bornes de recharge à l'horizon 2030.

Pour préciser la mise en oeuvre de cette loi, la programmation pluriannuelle de l'énergie prévoit un volet sur la mobilité propre, qui renouvelle l'objectif de 2 millions de véhicules électriques à l'horizon 2030. Pour cela les moyens d'actions évoqués sont : le lancement d'un appel à projet mondial pour un véhicule électrique à moins de 7000 €, l'obligation pour les flottes publiques, les loueurs de voiture, les taxis et VTC ainsi que les flottes de bus et autocars des transports collectifs d'acheter entre 20% et 50% de véhicules propres, la possibilité d'une tarification avantageuse pour les véhicules propres sur les autoroutes, mise en place de formations pour la maintenance des véhicules électrifiés, le développement de projets de recyclages et réemploi des batteries.

Au niveau local, de nombreux territoires ont aussi mis en place des dispositifs pour encourager le déploiement des véhicules électriques. Par exemple, des incitations financières, telles que subventions ou gratuité du stationnement, ou non financières, telles que stationnement réservé, voies réservées, installation d'infrastructures de recharge, bus électriques, ou mise à disposition de flottes partagées en libre service (Autolib).

1.5 Conclusion

Le véhicule électrique n'est qu'une solution parmi la multitude de solutions proposées pour réduire les émissions de CO₂ dans les transports en ville. Celle-ci est cependant souvent mise en avant, car elle permettrait de ne changer que marginalement nos habitudes de déplacement.

Le potentiel de réduction d'émission offert par cette solution dépend en grande partie de l'ampleur de l'adoption de ce véhicule par les usagers.

La plupart des scénarios proposés par les études citées dans ce chapitre pour évaluer le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique par rapport aux autres technologies, s'appuient sur des hypothèses de part de marché du véhicule électrique exogènes.

Or, il paraît nécessaire, pour proposer une évaluation pertinente du potentiel du véhicule électrique, de tenir compte des déterminants de ces parts de marché. Celles-ci dépendent des choix de véhicule par les ménages, et notamment des caractéristiques spatiales qui pourraient différencier ces ménages et leur choix de véhicule. Nous avons vu dans ce chapitre, le lien entre mode de transport utilisé et forme urbaine, donc entre mode de transport et localisation des ménages dans la ville.

Ainsi, nous avons vu que les liens entre les solutions du levier structure de la mobilité et la nature de la forme urbaine ont été largement étudiés. Mais la forme urbaine peut aussi interagir avec les solutions du levier technologique, et au delà du mode de transport, elle peut influencer le choix du type de véhicule privé.

L'évaluation du coût de déploiement du véhicule électrique est elle aussi exprimée pour quelques ménages types et le plus souvent pour quelques scénarios futurs. Or les perspectives sur l'évolution de la technologies et sur les prix futurs des carburants sont incertaines. Pour les politiques de réduction des émissions dans les transports, cette incertitude doit être prise en compte dans la mise en oeuvre d'une solution.

Les chapitres suivant vont nous permettre d'explicitier les outils nécessaires pour tenir compte de la forme des villes dans le potentiel de réduction d'émissions qu'offre le véhicule électrique et de prendre en compte l'incertitude dans l'évaluation des coûts.

Nous allons commencer par détailler nos hypothèses de modélisation du choix de véhicule par ménages, pour pouvoir tenir compte par la suite de l'influence de la localisation de ces ménages sur le choix du véhicule électrique.

Chapitre 2

Modélisation du choix de véhicule par les ménages

Dans ce chapitre, nous allons décrire et justifier la modélisation des choix de véhicules particuliers par les ménages développée au cours de cette thèse et utilisée dans les chapitres suivants. Ce module vise à simuler les choix des technologies de véhicule, et plus précisément des types de motorisations, par les ménages habitant dans une ville donnée. Il sera couplé au modèle de ville NEDUM-2D, qui représente les choix de localisation des ménages dans la ville et permettra alors d'étudier les interactions de l'introduction du véhicule électrique avec la répartition des ménages dans la ville.

La première section de ce chapitre décrit les choix de modélisation que nous avons fait. Les véhicules sont différenciés par leur coût d'achat, leur consommation et le carburant utilisé. Les ménages sont différenciés par les distances qu'ils parcourent. Nous avons utilisé deux modélisations un peu différentes au cours de cette thèse. Dans l'une d'entre elle, le choix de la technologie s'appuie uniquement sur le coût total de possession de chaque véhicule : cette modélisation offre une vision simplifiée du choix du véhicule. Dans l'autre, le choix technologique s'appuie sur un modèle de choix discret, calculé à partir du coût total de possession. Avant de décrire les modélisations, nous rappellerons les bases théoriques sur lesquelles nous nous sommes appuyés.

La seconde section de ce chapitre justifie et discute les principales hypothèses de modélisation choisies. Tout d'abord, nous expliquons pourquoi nous choisissons de fonder les choix des technologies des ménages sur les différences de coût total de possession de ces technologies. Puis nous justifions la représentation de l'hétérogénéité des ménages par les distances qu'ils parcourent et par un paramètre sur leur rationalité limitée dans le modèle de choix discret. Pour cela nous nous appuyons sur la littérature empirique et sur les choix de modélisation alternatifs utilisés dans d'autres modèles de prospective.

2.1 Modélisation adoptée dans cette thèse

2.1.1 Trois types de véhicules

Nous faisons le choix de comparer trois technologies de véhicules différentes, en considérant le véhicule moyen pour chacune des technologies et en faisant l'hypothèse que les caractéristiques autres que le coût et la consommation (gamme, puissance, carrosserie) sont distribuées de façon identique sur chaque technologie. Nous étudions deux véhicules thermiques, en distinguant diesel et essence car se sont les deux technologies les plus largement représentées sur le marché. Nous considérons aussi un véhicule électrique, afin d'analyser sa diffusion.

S'agissant du véhicule électrique, cette hypothèse de distribution identique des caractéristiques des véhicules est forte puisqu'il n'existe que quelques modèles disponibles aujourd'hui et ceux-ci sont essentiellement de petits véhicules urbains. Cependant, les travaux qui suivent se concentrent sur des analyses prospectives, en essayant d'évaluer les différents impacts de la disponibilité du véhicule électrique. Nous faisons donc l'hypothèse que cette disponibilité se traduira, entre autre, par la disponibilité de différents modèles, offrant aux automobilistes des caractéristiques aussi variées que celle du diesel et de l'essence.

Cette hypothèse ne peut évidemment être soutenue qu'en supposant un progrès technologique (notamment sur la capacité des batteries) suffisant pour permettre cette évolution. La vraisemblance de cette hypothèse peut être discutée, mais nous considérons que l'étude des effets de la disponibilité du véhicule électrique n'a d'intérêt qu'en supposant que cette technologie est viable techniquement. De plus, plusieurs travaux montrent que les potentiels progrès sur cette technologie sont prometteurs (voir chapitre 1).

Alors, le choix entre véhicule électrique et véhicule thermique répondrait en partie aux mêmes déterminants que le choix entre un véhicule essence et un véhicule diesel.

2.1.2 Déterminants du choix du type de motorisation

Les consommateurs ne prennent pas uniquement en compte le coût d'achat et d'usage lors de leur choix du véhicule, mais ils restent les premiers déterminants de leur décision d'achat. Nous choisissons donc d'approximer le choix de la technologie de véhicule des ménages par la comparaison entre les différents coûts d'achat et coûts d'usage des technologies. Les variables explicatives du choix d'un ménage sont alors : le coût d'achat et la consommation du véhicule, le prix des énergies et le kilométrage du ménage. Nous n'avons pas tenu compte des coûts d'assurance, de parking et d'entretien. L'estimation de ces derniers pour le véhicule électrique est encore incertaine car peu de données sont disponibles. Cepen-

dant, il semblerait que leur prise en compte aurait favorisé le choix du véhicule électrique car le coût d'entretien et le coût de l'assurance sont estimés plus faibles par Cambridge Econometrics and Ricardo-AEA (2013). En effet, le moteur du véhicule électrique est plus simple à entretenir et plus fiable.

Nous supposons donc qu'un agent choisira la technologie de son véhicule uniquement en fonction du coût total de possession (total cost of ownership), étant donné que toutes les autres caractéristiques sont disponibles dans chacune des technologies.

De cette hypothèse nous dérivons deux modèles de choix. Le premier, très simple, détermine les choix des ménages comme ne résultant que de la comparaison du coût total de possession et sera utilisé dans le chapitre 6. Ceci nous permet de calculer le bénéfice financier que retirerait un individu parfaitement rationnel de l'utilisation du véhicule électrique.

Le second, s'appuie sur un logit multinomial pour ajouter un terme aléatoire dans le choix du véhicule et relâcher un peu l'hypothèse d'un choix systématiquement orienté vers la technologie la moins chère. Cette modélisation sera utilisée dans les chapitre 4 et 5. Nous détaillons donc ces deux modélisations.

2.1.3 Modèle de choix uniquement basé sur le coût

La suite de l'analyse utilise donc le coût total de possession ("total cost of ownership" ou TCO) pour comparer des technologies de véhicule qui sont supposées avoir des caractéristiques identiques, mis à part le coût et la consommation de carburant.

Le calcul du TCO se fait selon la formule suivante (Eq. 2.1 :

$$TCO = C_{Inv} + \sum_{t=1}^T \frac{L \cdot (c_j \cdot p_j)}{(1+i)^t} \quad (2.1)$$

C_{Inv} est le prix du véhicule, L la distance parcourue sur une année, c_j est la consommation kilométrique de la technologie j et p_j le prix du carburant utilisé par la technologie j , i est le taux d'actualisation et T la durée de possession de la voiture.

Ici, nous avons choisi d'utiliser un TCO annualisé (ATCO), permettant ainsi de ne pas faire d'hypothèse sur les projections que font les agents sur les prix des énergies. En effet dans la formule du ATCO, nous n'avons à faire d'hypothèse que sur les prix des énergies à une année donnée (Eq.2.2).

$$ATCO = \frac{C_{Inv}}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+i)^t}} + L \cdot (c_j \cdot p_j) \quad (2.2)$$

Si nous considérons p_{fuel} et p_{elec} constants dans le temps dans 2.1, nous pouvons définir le lien avec le TCO, nous pouvons alors écrire la relation suivante entre les deux valeurs (Eq.2.3) :

$$TCO = \sum_{t=1}^T \frac{ATCO}{(1+i)^t} \quad (2.3)$$

Le modèle de choix utilisé dans le chapitre 6 n'est pas probabiliste, il repose sur le coût, sans tenir compte de la possibilité pour deux ménages identiques de faire des choix différents. Il permet tout de même de tenir compte de l'hétérogénéité des agents en considérant leurs kilométrages annuels dans le choix du véhicule. Nous évitons ainsi d'estimer des flottes de véhicules composées à 100% d'une même technologie. Pour chaque consommateur, le choix du véhicule se porte donc sur le véhicule avec l'ATCO le moins cher pour une année donnée. La différence de choix entre les agents découle donc uniquement de la distance de leurs déplacements. Les parts de marché sont alors calculées comme suit :

$$\begin{aligned} \forall j, k, l \in T, \\ B_j &= \{ATCO_j^i, \forall i \in A \mid ATCO_j^i \leq ATCO_k^i \text{ et } ATCO_j^i \leq ATCO_l^i\} \\ Pdm_j &= \frac{Card(B_j)}{Card(A)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Avec T l'ensemble des technologies, B_j l'ensemble des conducteurs intéressés par la technologie j , $ATCO_j^i$ l'ATCO du conducteur i pour la technologie j et A l'ensemble des conducteurs. $Card$ définit ici le cardinal de l'ensemble.

A ce modèle déterministe, nous ajoutons maintenant une variable aléatoire, pour tenir compte de la variabilité des agents dans leur choix.

2.1.4 Modèle de choix discret avec logit multinomial

Base théorique des modèles de choix discret

Les modèles de choix discrets trouvent des applications dans de nombreux domaines : en marketing ils permettent de prédire les ventes, ils permettent d'estimer les effets d'une politique, ou encore dans les transports ils permettent de déterminer les choix d'un mode de transport.

Le choix d'un véhicule par les ménages dépend de plusieurs facteurs portant sur le véhicule comme la taille, la marque, le carburant, la consommation, ou encore le confort ainsi que des facteurs portant sur les ménages comme le revenu, la taille, les distances parcourues ou le niveau d'éducation.

Les modèles de choix discret permettent de séparer les déterminants rationnels d'une décision des éléments non expliqués et ainsi d'estimer l'influence des caractéristiques des différentes alternatives. Il s'agit d'intégrer d'un côté les composantes variables d'une décision afin d'identifier d'un autre côté, les régularités des processus de choix. Les résultats donnent alors la probabilité pour tel ménage de choisir tel mode de transport ou véhicule.

Pour cela, il faut définir les différentes alternatives d'un choix, les caractéristiques de ces options et du preneur de décision, définir les règles de décision et tenir compte des incertitudes et des aspects non expliqués des décisions.

La règle de décision repose sur la maximisation d'une fonction d'utilité que l'on découpe en deux parties. La première dépend des caractéristiques de chaque alternatives et du preneur de décision et que l'on appelle la partie déterministe. La seconde partie tient compte des incertitudes sur la modélisation ou de la rationalité limitée du preneur de décision représentée par un terme aléatoire. Le modèle devient alors probabiliste.

Autrement dit, si nous posons pour chaque individu, l'utilité associée au choix d'un alternative :

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad (2.5)$$

Avec i une des alternatives parmi C , un ensemble discret, V la partie déterministe de la fonction d'utilité, expliquée par les attributs de l'individu ou des alternatives, et ε_i une variable aléatoire.

La partie déterministe de la fonction d'utilité est modélisée par une fonction linéaire ou log-linéaire de chacun des attributs. Le terme d'erreur est une variable aléatoire.

Dans un exemple où $C = \{1, 2\}$, la probabilité de choix de l'alternative 1 est :

$$\begin{aligned} P(1|\{1, 2\}) &= P(U_1 \geq U_2) = P(V_1 + \varepsilon_1 \geq V_2 + \varepsilon_2) \\ &= P(V_1 - V_2 \geq \varepsilon_2 - \varepsilon_1) = P(V_1 - V_2 \geq \varepsilon) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Nous venons de présenter le modèle de choix discret à utilité aléatoire qui s'appuie sur les travaux de Thurstone (1927), McFadden et al. (1973) et McFadden (2000). Ceux-ci considèrent que les individus sont rationnels mais la modélisation est imparfaite. Il est le plus largement utilisé dans les études économétriques.

Le terme d'erreur peut cependant être interprété de différentes manières, résumées dans Thisse and Billot (1995). La plus courante consiste à considérer que c'est le modélisateur qui n'est pas capable de résumer l'ensemble des alternatives, il introduit donc un terme d'erreur à côté des variables explicatives qu'il a choisi.

Une autre manière d'interpréter ce terme d'erreur est de considérer que l'agent valorise différemment les alternatives selon le contexte (Thurstone, 1927). On tient alors compte d'une potentielle variabilité de leurs décisions. En introduisant un terme d'erreur dans la valorisation des alternatives qui se présentent à eux, on tient compte de l'hétérogénéité de leur perception et donc de leur valorisation de ces alternatives.

On peut aussi considérer que l'agent ne connaît pas bien ses préférences, si en moyenne, celui-ci fait des choix rationnels, il arrive qu'il ait parfois du mal à discerner sa préférence.

Enfin, on peut aussi voir dans ce terme d'erreur une façon de prendre en compte le fait que l'individu peut se tromper dans son évaluation des alternatives. Un trop grand nombre d'alternatives oblige alors l'agent à choisir approximativement, en ne tenant compte que de certaines informations. Cette interprétation se rapproche de la théorie de la rationalité limitée de Simon (1957).

Pour définir ce terme d'erreur, il faut décrire sa moyenne, sa variance et sa distribution. Dans un premier temps, Thurstone (1927) proposait des termes d'erreur distribués selon une loi normale centrée réduite (modèle probit). Dans l'équation 2.6, on a ε_1 et ε_2 qui suivent donc une loi normale centrée réduite. Alors ε étant la somme de lois normales centrées réduites, il suit une loi normale de variance égale à $\sqrt{2}$. On a alors le résultat suivant, avec F la fonction de répartition de ε :

$$P(1|\{1,2\}) = P(V_1 - V_2 \geq \varepsilon) = F(V_1 - V_2) \quad (2.7)$$

Cette fonction de répartition n'a pas d'expression analytique.

McFadden et al. (1973) propose d'utiliser une loi logistique pour décrire ε (modèle logit).

Si les termes d'erreur de chaque individu sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, alors le maximum des termes d'erreur suit approximativement une loi de Gumbel. On suppose alors que ε_1 et ε_2 suivent des lois de Gumbel de paramètre 0 et 1.

Alors, ε suit une loi logistique de paramètre 0 et 1 et sa fonction de répartition s'écrit :

$$P(c \geq \varepsilon) = F(c) = \frac{1}{1 + \exp(-c)} \quad (2.8)$$

On a alors :

$$P(1|\{1,2\}) = \frac{\exp(V_1)}{\exp(V_1) + \exp(V_2)} \quad (2.9)$$

On peut alors généraliser avec le modèle logit multinomial suivant (Palma and Thisse, 1989) en écrivant la probabilité de choix d'une alternative i parmi C un ensemble discret et fini :

$$P(i|C) = \frac{\exp(V_i)}{\sum_{j \in C} \exp(V_j)} \quad (2.10)$$

Le modèle multinomial met toutes les alternatives de choix au même niveau, sans donner la possibilité de conditionner certains choix à d'autres. Le modèle "nested logit", ou logit emboité, est une variante du modèle logit multinomial. Il permet de considérer des alternatives corrélées entre elles et donne donc la possibilité de considérer les choix successifs, quand certaines alternatives sont dépendantes les unes des autres (McFadden et al., 1984). Les paramètres estimés sont alors imbriqués. Par exemple, le choix du mode de transport peut être décomposé en un premier choix entre transport en commun et transport privé, puis selon le mode : bus, métro, vélo... Ou encore, le choix d'un véhicule peut être conditionné au nombre de véhicules dont dispose le ménage.

Nous venons de décrire la structure théorique des modèles de choix discrets. L'équation 2.10 nous permettra de calculer les parts de marché de chaque technologie dans notre modèle, décrit à la fin de ce chapitre.

Modèle de choix discret adopté dans cette thèse

Ce modèle de choix discret nous permet de tenir compte de la variabilité dans les décisions des consommateurs. Dans notre cas, nous évitons ainsi le cas où la technologie la moins chère est systématiquement choisie par un même type de ménage. Cela nous permet de représenter le fait que le coût (calculé via le TCO) n'est pas le seul et unique déterminant du choix du véhicule (cf section précédente).

La valorisation des coûts par les individus est accompagnée d'un terme d'erreur qui représente l'ensemble des variables subjectives non mesurées ou non mesurables (autant pour le modélisateur que pour l'agent) qui sont approchées par des variables aléatoires. La somme de ces termes d'erreur suit une loi logistique (Palma and Thisse, 1989) et la probabilité de choix de chaque technologie peut être calculée pour chaque individu.

Les ATCO, tel que calculés dans la section précédente, sont introduits dans une fonction d'utilité aléatoire qui permet de calculer ensuite la probabilité d'uti-

lisation de chacune des technologies en fonction de leurs coûts relatifs pour un ménage. L'utilité associée à la technologie j est donnée par l'équation 2.11.

$$U_j = -\alpha \frac{c_j}{c_{min}} + \varepsilon_i \quad (2.11)$$

Avec α le paramètre associé au logit, c_j l'ATCO de la technologie j et c_{min} l'ATCO le plus faible des trois technologies, ε_i la variable aléatoire associée au choix de la technologie j .

Dans cette fonction d'utilité, le coût de chaque technologie est normalisé par celui de la technologie la moins chère, afin de tenir compte de l'écart relatif des coûts, et non pas de leur écart absolu.

Pour une technologie donnée, plus l'écart de coût à la technologie la moins chère est grand, plus l'utilité associée à cette technologie est faible. Nous remarquons que si la technologie j est la moins chère, alors l'utilité qui lui est associée est égale à $-\alpha$.

En suivant le modèle expliqué dans la première section (2.1), nous calculons la probabilité de choix de chaque technologie par un ménage. Cela peut aussi être la probabilité de choix de chaque technologie dans un groupe de ménages partageant les mêmes caractéristiques. Nous interprétons alors ces probabilités comme des parts de marché.

En combinant les équations 2.10 et 2.11, nous calculons la part de marché de la technologie j :

$$pdm_j = \frac{\exp(-\alpha \frac{c_j}{c_{min}})}{\sum_{k=1}^3 \exp(-\alpha \frac{c_k}{c_{min}})} \quad (2.12)$$

Avec α le paramètre associé au logit, c_j l'ATCO de la technologie j et c_{min} l'ATCO le plus faible des trois technologies.

Le paramètre α résume le degré de variabilité dans le choix des consommateurs. Plus celui-ci est élevé, plus le choix est influencé par les différences de coûts, inversement plus celui-ci est faible, moins les coûts relatifs impactent la répartition des parts de marché entre les trois technologies.

Celui-ci est calibré pour obtenir des parts de marchés cohérentes avec celles observées en 2007 en Ile de France pour le diesel et l'essence, soit une répartition de 45% pour le diesel et 55% pour l'essence. La valeur d' α est fixée à 1,5. Les parts de marché observées correspondent à celles simulées dans le modèle entre 2007 et 2015 pour l'Ile-de-France. Sur cette période, on observe une augmentation

des prix des carburants, ceci renforce l'influence du coût d'usage sur le choix des technologies et favorise donc l'utilisation du diesel.

Ceci suppose que tous les automobilistes choisissent leur véhicule en fonction de l'ATCO sur cette année. Le calibrage des parts de marché sur une année néglige l'inertie liée au renouvellement progressif de la flotte de véhicule.

Ce paramètre est spécifique à notre modélisation et ne peut donc pas être comparé. Un paramètre inférieur à 1 est faible et les choix ne sont presque pas influencés par le coût, quand il est proche de zéro, les parts de marchés sont alors réparties de manière égales entre les technologies, quelque soit leur coût. Un logit entre 5 et 10 est élevé. Une faible variation des coûts influence les parts de marchés. Des études de sensibilité seront menées sur ce paramètre, afin de déterminer son influence sur les résultats.

Le modèle de choix discret des transports que nous avons décrit ici est intégré dans un modèle de ville qui simule les choix de localisation des ménages. Ceci nous permet d'avoir une simulation des choix de type de véhicule et de mode de transport qui tiennent compte de la dimension aléatoire de la description de ces choix.

2.2 Discussion autour des hypothèses de modélisation

Dans cette section nous allons justifier les choix de modélisation faits dans cette thèse. Nous allons notamment nous appuyer sur les analyses empiriques que permettent les modèles de choix discrets pour justifier de l'utilisation de l'ATCO comme seul déterminant du choix. Puis, nous nous appuyerons sur les autres modélisations prospectives pour comparer leur représentation de l'hétérogénéité et de la rationalité limitée des ménages.

Dans le cas qui nous intéresse ici, les modèles de choix discrets expliquent le choix d'un véhicule parmi un nombre fini d'alternatives mutuellement exclusives. La partie déterministe de la fonction d'utilité dans la section précédente (V_i) est constituée des variables explicatives du choix, auxquelles sont attribués des paramètres que l'on estime. Ces estimations donnent alors la disponibilité à payer des ménages pour chaque caractéristique prise en compte. Les variables explicatives tiennent compte des caractéristiques de chaque véhicule, de chaque consommateur et de variables contextuelles comme le prix des énergies.

L'étude des déterminants du choix d'un véhicule à l'aide de modèles de choix discret s'est développée dans les années 80 pour répondre au besoin de prévision de la demande d'automobiles des constructeurs. Ces modèles ont permis un approche désagrégée, qui détaille les caractéristiques des véhicules et des consom-

mateurs influençant les décisions d'achats de ces consommateurs. Baltas and Saridakis (2013) fournissent une revue de littérature des modèles de choix discrets (modèle logit multinomial et nested logit).

Parmi l'ensemble des déterminants des véhicules et des ménages étudiés, les composantes du coût sont identifiées comme des facteurs déterminants du choix.

Ces composantes sont le coût d'achat et le coût d'usage. Le coût d'achat a systématiquement un impact négatif sur le choix d'un véhicule.

L'influence du coût d'usage est plus discutée. Nous allons donc nous attarder sur les résultats de la littérature s'intéressant à l'influence du coût d'usage sur le choix du type de véhicule. Comme l'analyse de cette thèse s'intéresse au choix entre véhicule essence, diesel et électrique, nous nous attacherons plus précisément aux résultats portant sur l'influence du coût d'usage sur le choix du type de carburant ou de technologie de motorisation. Le coût d'usage est dépendant de la consommation énergétique du véhicule, du prix du carburant et des distances parcourues, nous découpons donc la présentation ainsi.

2.2.1 Caractéristiques du véhicule

Prix du carburant

La littérature sur le choix du type de motorisation (ou le choix du carburant) montre que ce choix peut être influencé par différents facteurs comme le prix, la fiabilité, la disponibilité du carburant et l'autonomie. Mais la plupart des analyses montrent que dans le choix du carburant, le prix du carburant est un des principaux facteurs déterminants (Bunch et al., 1993; Choo and Mokhtarian, 2004).

Le rôle des prix dans le choix du carburant a surtout été étudié à travers la question de l'impact des taxes sur le prix du carburant sur le choix du véhicule ou encore à travers l'impact des subventions au prix d'achat comme le système de bonus-malus.

D'Haultfoeuille et al. (2014) montrent par exemple, que le système de bonus-malus en France a eu un effet visible sur les décisions d'achat des consommateurs qui se sont tournés vers des véhicules plus propres, entraînant une baisse des émissions de CO₂ de presque 10% sur le long terme. Leinert et al. (2013) montrent qu'en Irlande, la mise en place d'une taxe annuelle sur les émissions de CO₂ des voitures a renchéri l'utilisation des véhicules à essence et favorisé l'achat des voitures au diesel. Greene (1989) montre aussi une forte élasticité du type de carburant choisi au prix des carburants. Enfin, Klier and Linn (2013) notent, quand à eux, une forte différence entre leurs estimations pour les États-Unis et celles pour l'Europe, l'effet des prix sur les économies de carburant étant deux fois plus grand aux États-Unis.

Cependant, il faut faire remarquer que ces élasticités ne sont pas forcément constantes. L'importance du prix des énergies dans le choix du carburant peut être asymétrique. C'est ce que Gately and Huntington (2002) nous amènent à penser en montrant que la réponse de la demande d'énergie (donc entre autre la demande d'énergie pour le transport) au prix du pétrole, est plus forte en cas de hausse qu'en cas de baisse des prix.

De même, l'importance du prix des énergies dans le choix du type de carburant peut être d'autant plus grande que celui-ci augmente.

Déterminants spécifiques au choix d'un véhicule électrique

Dans le cas du véhicule électrique la technologie n'est pas encore parfaitement substituable aux autres, notamment à cause de sa faible autonomie et de la taille du réseau de recharge. Concernant la décision d'achat d'un véhicule électrique, le coût n'est donc pas le seul déterminant principal. L'autonomie est aussi un facteur important (Bunch et al., 1993; Axsen and Kurani, 2013). Ewing and Sarigöllü (1998) cherchent les facteurs influençant le choix d'acheter un véhicule propre avec un logit multinomial : outre le coût du véhicule, ils montrent eux aussi l'importance de l'autonomie de la batterie dans la décision d'achat d'un véhicule électrique. En Europe, Tran et al. (2012) rapportent que 74% des consommateurs attendent d'un véhicule une autonomie supérieure à 480km pour faire disparaître leur anxiété vis à vis des recharges. Ils rapportent aussi que les automobilistes sont prêts à payer pour le développement d'infrastructures de recharge rapide (plus de 50% sont prêts à payer entre 500 et 1000 \$ pour diviser par deux le temps de recharge).

L'importance de déploiement du réseau de recharge, notamment de la recharge à domicile, sur le potentiel de demande des véhicules électriques est aussi souligné par les résultats de Lin and Greene (2011)

Enfin Axsen et al. (2009) soulignent l'importance du "neighbor effect", c'est à dire l'impact de la diffusion d'une technologie sur les préférences des agents dans le choix de nouvelles technologies telles que le véhicule électrique, en rappelant que les préférences peuvent évoluer dans le temps.

Nous avons choisi de ne retenir que l'autonomie restreinte de ces véhicules dans les calculs de choix du véhicule. Nos analyses s'intéressent à l'introduction du véhicule électrique dans le parc de véhicule, nous supposons donc qu'à l'horizon temporel de nos analyses (2050), les efforts sur les capacités de recharge auront été suffisants.

Consommation des véhicules et paradoxe de l'efficacité énergétique

Par la suite, certaines analyses se sont appliquées à observer la manière dont les ménages valorisaient le coût d'usage et notamment les économies de carburants. Ces analyses ont donné lieu à de nombreuses estimations parfois divergentes, plus connues sous le nom de paradoxe de l'efficacité énergétique.

Le paradoxe de l'efficacité énergétique part du constat que les technologies efficaces mettent du temps à être adoptées, alors qu'elles apportent un avantage financier aux ménages. Jaffe and Stavins (1994) expliquent la lente diffusion des technologies efficaces de deux façons. La première consiste à considérer que les agents ne calculent pas parfaitement les bénéfices futurs que leur apporte la technologie. La seconde considère qu'il existe des coûts cachés à l'adoption de cette nouvelle technologie que l'économiste ne parvient à révéler.

Ainsi, concernant la consommation en carburant du véhicule, de nombreuses analyses se sont intéressées à l'existence de ce paradoxe, autrement dit à savoir si les consommateurs sous-évaluent les coûts d'usage d'une voiture lors de son achat.

Ce paradoxe est défini par l'idée que les ménages valorisent mal les futures dépenses en carburant. Ceux-ci sous-évaluent les économies futures qu'ils pourraient réaliser en achetant un véhicule à faible consommation. Selon les analyses, la disposition à payer aujourd'hui par dollar économisé dans le futur, se situe entre 0,35 et 0,79\$. Ceci permet d'expliquer la lente diffusion des technologies les plus sobres (Greene, 2010; Allcott, 2011; Allcott and Wozny, 2013).

Même si beaucoup d'analyses révèlent l'existence de ce paradoxe, d'autres montrent au contraire que les consommateurs évaluent correctement les économies d'énergie des voitures (Espey and Nair, 2005) et que "l'energy paradox" est donc surévalué (Bento et al., 2012).

Turrentine and Kurani (2007) précisent de leur côté, à l'aide d'entretiens avec des ménages, que ceux-ci ne calculent pas les coûts d'usage d'un véhicule avant de l'acheter et quand on leur propose de les calculer ils se trompent en sous-évaluant ou sur-évaluant.

Dans sa revue de littérature sur ce paradoxe, Greene (2010) conclut que les estimations des disponibilités à payer des agents pour une réduction de la consommation des véhicules sont trop divergentes pour déclarer si ce paradoxe existe ou pas.

Nous tirons deux enseignements de ces résultats. D'abord les ménages ne calculent pas toujours de manière rationnelle les coûts d'usage des véhicules. Il paraît donc nécessaire d'en tenir compte dans nos simulations futures. Ensuite les ménages sous-évaluent peut-être les futures économies d'énergie liées à la consommation des véhicules, mais celles-ci font tout de même partie des facteurs influen-

çant le choix du véhicule. La consommation des véhicules a donc sa place dans le calcul du choix du véhicule.

2.2.2 Caractéristiques des ménages

Nous avons vu jusqu'ici les facteurs du cout influençant le choix du type de carburant par les ménages propres aux véhicules. Nous maintenant nous pencher sur les caractéristiques propres aux ménages.

Lave and Train (1979) ont été les premiers à utiliser le modèle logit multinomial pour étudier le choix des voitures. Ceci leur a permis d'intégrer un plus grand panel de caractéristiques des ménages et des véhicules dans leurs estimations, comme le poids, les dimensions et la puissance des véhicules ou la taille, l'âge et le nombre de voitures des ménages. Ils montrent entre autre que l'achat de gros véhicules est surtout l'apanage des ménages âgés, de ceux qui roulent beaucoup et des hauts revenus.

Distances parcourues

Peu d'analyses s'intéressent précisément au lien entre choix entre les différents types de carburants disponibles et leur utilisation (distance parcourue). Pourtant, de nombreux magazine spécialisés ou sites internet proposent de guider les utilisateurs dans leur choix de motorisation en s'appuyant sur les distances annuelles parcourues.

Verboven (2002) montre que l'hétérogénéité des kilométrages effectués par les ménages est bien le premier facteur explicatif des parts de marché du diesel et de l'essence.

Linn (2014) montre que le principal déterminant de l'adoption du diesel est l'économie de carburant. Cette économie augmente avec les distances parcourues par les utilisateurs.

Schipper et al. (2002) montrent qu'en 1995 en France les possesseurs de diesel roulaient 83% de plus que les possesseurs d'essence. Ce chiffre datant un peu, nous effectuons le même calcul en nous appuyant sur données plus récentes de l'ENTD (ENTD, 2008). En 2007 en France, les possesseurs d'une voiture diesel effectuaient 72% de kilomètres en plus que les possesseurs d'une voiture essence.

Puis nous observons l'influence du kilométrages annuel sur le choix du type de carburant en France en utilisant ces mêmes données.

Nous regardons, dans une première approche, la part du diesel en fonction des kilométrages annuels effectués par les ménages. La figure 2.1) permet de voir que le taux de possession d'un véhicule diesel augmente en même temps que les kilométrages annuels effectués. Ce graphique ne permet pas d'établir de lien de causalité, mais renforce l'idée que, toute chose égale par ailleurs, un ménage

qui roule suffisamment dans l'année va préférer un véhicule roulant au diesel. A partir de ces données, nous calculons que le choix d'un véhicule diesel devient majoritaire au delà d'environ 11 000km par an.

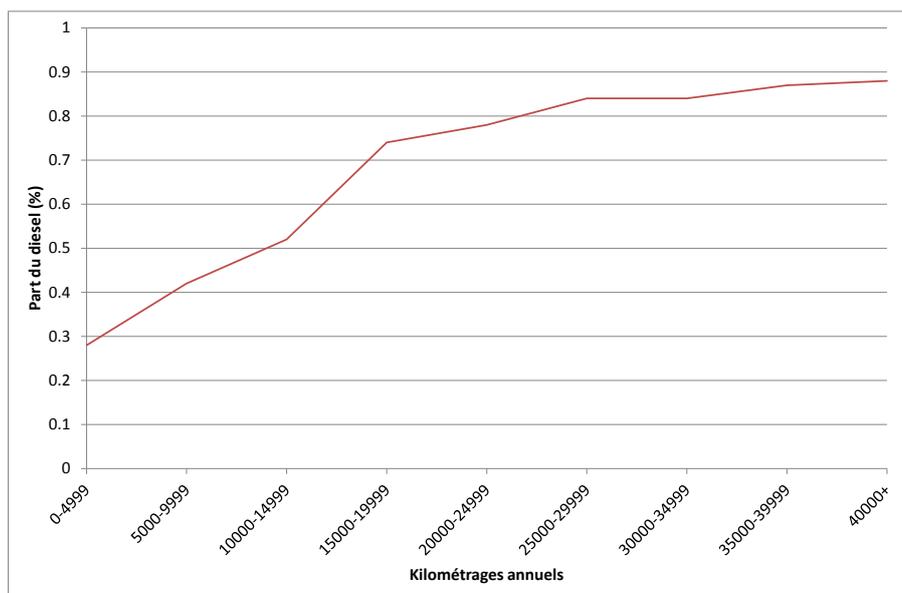


FIGURE 2.1 – Part du véhicule diesel et moyenne des kilomètres parcourus par an en France (Données : ENT D)

En se concentrant sur le territoire de l'Ile de France, nous retrouvons le même phénomène (Tab.2.2). Nous remarquons que plus on s'éloigne du centre, plus les distances annuelles sont grandes et plus les ménages possèdent des véhicules au diesel. Le diesel est le carburant le moins cher mais le prix des véhicules l'utilisant est plus élevé. Il est donc rationnel d'utiliser un véhicule diesel pour un ménage qui parcourt des distances suffisamment élevées dans l'année.

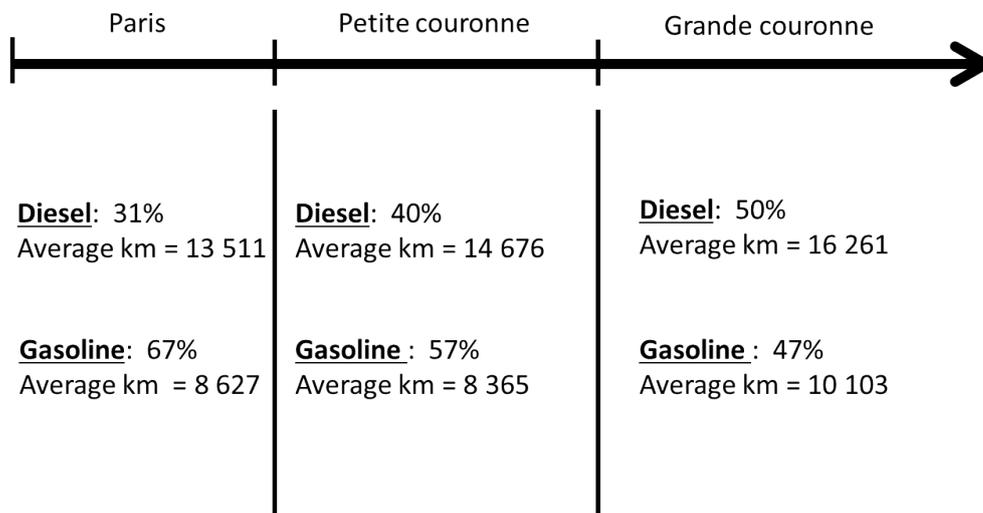


FIGURE 2.2 – Distribution des véhicules à essence et diesel et moyenne des kilomètres parcourus par an en Ile de France

2.2.3 Résumé

Nous avons donc retenu que le coût d'achat, la consommation, le prix du carburant, et les distances parcourues sont des déterminants essentiels du choix du type de technologie à l'achat. Ces déterminants sont constitutifs du coût d'achat et d'usage d'un véhicule.

Néanmoins, nous avons aussi pu constater qu'à l'échelle individuelle, le coût d'achat n'est pas toujours pris en compte de manière exacte. De plus, il existe d'autres facteurs de choix et ceux-ci ont des importances variables selon les ménages.

A l'échelle agrégée, les ménages sont hétérogènes et leurs choix le sont donc aussi.

Pour modéliser et simuler le choix de technologie de l'ensemble des ménages, il nous a donc fallu tenir compte du coût de ces technologies, mais aussi d'une part de rationalité limitée dans ce choix ainsi que de l'hétérogénéité de ces ménages.

Nous allons maintenant nous intéresser à la façon dont le choix du véhicule est représenté dans les simulations des modèles de prospectives qui décrivent le secteur des transports afin de voir comment la rationalité et l'hétérogénéité sont pris en compte.

2.2.4 Modèles de prospectives et choix technologiques

Les modèles des prospectives qui intègrent les choix des ménages en matière de transports s'appuient sur des simulations des comportements de ces ménages. L'approche la plus simple consiste à simuler un agent représentatif qui choisit la technologie la moins chère. Mais cette approche implique que 100% du marché est tournée vers une seule technologie (la moins chère). De plus une faible variation du coût peut faire basculer l'ensemble du marché vers une autre technologie (effet "bang-bang"). Pour améliorer le réalisme de cette modélisation, il faut tenir compte des résultats des analyses évoquées dans la section précédente.

Nous avons vu que le choix d'un véhicule était guidé par le coût d'achat et d'usage de celui-ci mais que ce coût n'était pas toujours pris en compte de manière rationnelle et que ce choix était variable selon les ménages.

Les modélisateurs ont alors utilisé deux approches pour tenir compte de ces constats.

D'un côté, la modélisation logit multinomial a été utilisée dans les modèles de prospectives qui intègrent la diffusion des technologies et le choix du mode de transport dans leurs scénarios. Cette modélisation permet d'aller au delà du simple coût financier et d'affiner la représentation de la demande des ménages en reconnaissant les limites de la rationalité de ces ménages dans leurs choix.

D'un autre côté, les modèles ont introduit de manière explicite l'hétérogénéité des agents en créant des catégories de ménages différentes, qui font des choix différents. Cette modélisation permet d'éviter que l'ensemble de la population choisisse la même technologie et permet d'identifier les caractéristiques des ménages qui leur font préférer une technologie à une autre.

Enfin certains modèles fusionnent ces deux approches et intègrent un logit dans différentes catégories de ménages.

Ces modélisations s'intègrent à une approche bottom-up, qui simule les comportements individuels des agents pour observer leurs résultantes à une échelle agrégée. On retrouve donc cette modélisation dans des modèles "energy-economy" qui emploient une approche bottom-up. Parmi eux, on distingue deux grandes catégories de modèles qui ont la possibilité de simuler les choix individuels de transport. La première réunit des modèles d'équilibres partiels qui adoptent une approche bottom-up et s'attachent à simuler les comportements individuels et décrire les technologies en détail. La seconde réunit les modèles dits hybrides, qui tentent de concilier cette approche bottom-up avec une approche macroéconomique (top-down) qui inclut les mécanismes économiques agrégés. Ces modélisations sont aussi utilisées dans les modèles sectoriels, qui décrivent avec précision le fonctionnement du secteur des transports. Enfin on retrouve ces modélisations dans les modèles de villes. Nous présentons ces modélisations dans cette section.

2.2.5 Modèles "energy-economy"

Les modèles de perspectives qui s'appliquent à l'échelle globale ont des représentations du secteur des transports plus ou moins détaillées. Schafer (2012) répertorie la façon dont sont pris en compte les comportements des ménages dans le secteur des transports des modèles dits "energy-economy" et souligne que ces comportements sont peu modélisés. Dans la plupart des modèles bottom-up la demande de transport est introduite de façon exogène ou s'appuie uniquement sur le choix de la technologie la moins chère, comme par exemple dans le modèle TIMES (Daly et al., 2014). Dans les modèles hybrides, la demande de transport est plus précise, elle est souvent endogène et modélisée via des élasticités prix. Cette modélisation implique d'avoir des données d'élasticité pour chaque catégorie de transports et de ménages, si l'on souhaite les distinguer. Parmi ces modèles, soit le choix des véhicules tient compte de l'hétérogénéité des ménages en distinguant des catégories soit ce choix est calculé à partir d'un logit multinomial.

Enfin certains modèles comme CIMS (Horne et al., 2005) intègrent un logit multinomial et des catégories de ménages pour décrire les choix de véhicules des ménages. Ceci permet d'avoir une représentation explicite du choix des agents et de distinguer ce choix selon les caractéristiques des ménages.

Le modèle CIMS est un modèle hybride "energy-economy" qui permet, entre autres, de simuler l'impact de politiques orientées vers les nouvelles technologies. Dans le modèle, le choix du véhicule dépend du coût d'achat et d'usage ainsi que d'un paramètre de coût non financier qui tient compte, par exemple, du temps de trajet et du confort. Un paramètre d'hétérogénéité du marché permet de moduler la sensibilité des ménages aux écarts d'attractivité entre les modes de transports. L'estimation économétrique d'un modèle de logit multinomial pour expliquer le choix de véhicules des agents, permet au modèle d'utiliser des paramètres réalistes dans ses simulations (Horne et al., 2005). Cette modélisation est similaire à celle que nous allons intégrer au modèle de ville car elle s'appuie sur un logit multinomial qui tient compte du coût des véhicules.

D'autres modèles ont récemment amélioré leur modélisation du choix des ménages, en intégrant un modèle qui s'appuie sur un logit multinomial. Parmi les modèles bottom-up d'équilibre partiel, TIMES a intégré le modèle sectoriel MA3T afin de mieux décrire la demande de véhicules (Bunch et al., 2015). Le modèle hybride MESSAGE a aussi récemment introduit MA3T dans son architecture (McCollum et al., 2016). Ce couplage permet de considérer l'hétérogénéité des ménages et les coûts intangibles liés à chaque type de véhicule. Nous détaillons ce modèle dans le paragraphe suivant.

2.2.6 Modèles sectoriels

Certains modèles comme le modèle MA3T représentent le secteur automobile avec beaucoup de détails, afin de simuler précisément la demande de véhicules. Ce modèle s'articule autour d'un nested logit qui tient compte de 40 combinaisons de choix possibles de véhicules (taille, prix, autonomie..) et de six caractéristiques pour distinguer les ménages, dont la zone de résidence et l'attitude envers les nouveautés. Ces choix sont influencés par les politiques et les prix du carburants. Les ventes impactent à leur tour l'offre de véhicules via, par exemple, des effets d'apprentissage.

Le modèle est dynamique et permet de comprendre la diffusion de nouvelles technologies dans les transports privés (Lin and Greene, 2010). Il montre, par exemple, l'importance de la disponibilité de la recharge au domicile dans la diffusion des véhicules électrifiés.

2.2.7 Modèles à l'échelle locale

Certains modèles s'intéressent au secteur des transports à une échelle locale. C'est le cas des modèles de villes qui décrivent la formation des villes et simulent leur évolution. Ces modèles s'appuient, entre autres, sur les choix des ménages en matière de transport, pour décrire la forme de la ville. Les différents modèles de ville sont décrits dans le chapitre suivant (chapitre 3). Nous nous focalisons ici sur l'utilisation du logit multinomial dans ces modèles pour décrire les transports.

Les modèles d'économie urbaine classiques décrivent les processus à l'oeuvre dans une ville de façon agrégée (Alonso, 1964). Le secteur des transports est modélisé par une fonction de coût, qui dépend de la distance et du prix des transports et les transports sont utilisés par un agent représentatif. Par la suite, certains modèles d'économie urbaine ont utilisé des modèles de choix discrets pour décrire les choix de localisation des ménages (De Palma and Lefevre, 1985; Anas, 1990), mais pas pour décrire les transports.

Plus récemment, les modèles intégrés interactifs qui sont, par nature, plus détaillés ont adopté une description plus précise des transports, mais qui est souvent représenté en terme d'accessibilité des différentes localités. Certains modèles comme URBANSIM intègrent un modèle de transport qui s'appuie sur un logit multinomial pour tenir compte des choix des ménages (Waddell et al., 2007). Ainsi, les projets de planification des transports et leur influence sur les villes peuvent être simulés de façon précise. URBANSIM a, par exemple, été utilisé pour simuler l'influence des projets de transport en commun du Grand Paris (De Palma et al., 2014).

Dans les analyses des chapitre 4 et 5, nous intégrons un modèle logit multinomial à un modèle qui découle des modèles d'économie urbaine standard. Ce

modèle de logit multinomial s'applique au choix du type de véhicule et nous permet de simuler la diffusion du véhicule électrique dans la demande de véhicule.

2.3 Conclusion

Dans cette thèse, nous modélisons le choix des ménages entre un véhicule essence, diesel ou électrique par un modèle de choix discret avec un logit qui s'appuie sur les différences de cout d'achat et d'usage de ces trois technologies. L'avantage de la modélisation logit est de pouvoir tenir compte des différentes caractéristiques des ménages et de la variabilité de leur choix. Des ménages avec les mêmes caractéristiques ne font pas systématiquement les même choix. Dans le modèle de ville que nous utilisons, les ménages se distinguent par leur localisation et donc l'utilisation qu'ils font des transports (distances) et parmi ces catégories de ménages, nous utilisons un logit pour tenir compte de leur rationalité limitée. La modélisation logit multinomial est utilisée dans plusieurs modèles de prospectives pour simuler les choix de transports. Cependant, cette modélisation n'a pas encore été appliquée à un modèle de ville standard pour décrire le choix des véhicules. En effet, nous verrons dans le chapitre suivant (chapitre 3) que le modèle de ville standard utilise une fonction de cout agrégée pour décrire les transports et calculer la localisation des ménages, sans détailler les choix de modes ou de véhicules des ménages.

Chapitre 3

Modélisation de la ville et des transports

Dans ce chapitre, nous nous penchons sur la modélisation des mécanismes expliquant la forme des villes.

Les villes se sont formées au fur et à mesure que l'agriculture a pu dégager des surplus et que le progrès technologique demandait des actions de plus en plus spécialisées, entraînant ainsi une division du travail (Mumford, 1961). Cette division du travail nécessitait un regroupement des travailleurs, tirant ainsi partie des avantages liées à la proximité, notamment de l'absence de coût des transports (Spielvogel, 2004). Ainsi l'accessibilité, c'est à dire la facilité d'accès aux lieux d'activité, via les réseaux de transports, justifie en partie l'existence des villes.

Au delà de leur existence, la relation entre les systèmes de transport et ces villes permet aussi de comprendre la façon dont celles-ci se structurent. Ainsi, la forme de la ville est influencée par le système de transport existant et inversement, ce système de transport se développe en fonction de la forme de la ville (voir chapitre 1). Cette relation est donc au centre des mécanismes des modèles représentant les villes.

Dans un premier temps, nous détaillons les modèles de villes en économie et leurs évolutions. Dans deuxième temps, nous présentons le modèle de ville appliqué, NEDUM-2D, que nous allons utiliser pour étudier l'influence de l'introduction du véhicule électrique sur la ville. Puis, dans un troisième temps, nous présentons la façon dont le module de choix du véhicule décrit dans le chapitre 2 s'intègre à NEDUM-2D.

3.1 Les modèles de forme urbaine

L'étude de la forme d'une ville a pour objectif de comprendre les mécanismes à l'oeuvre dans la mise en place de la structure des villes et leur croissance. Par structure nous entendons la répartition des habitants, des emplois, les déplacements dans la ville ou encore les aménagements urbains. Ce champs d'étude s'est développé au cours du XXème siècle. En suivant la classification de Wegener and Furst (2004), on distingue plusieurs façons de modéliser la structure urbaine, attachées à différentes théories d'organisation de la ville.

Dans un premier temps les théories sociales (historiens, géographes, sociologues), notamment au sein de l'école de Chicago, se sont intéressées à la structure de la ville comme résultante des relations entre les différents groupes sociaux. Cependant ces approches sont essentiellement qualitatives et n'explicitent pas les interactions entre forme urbaine et système de transports.

Plus tard, la définition de budget temps (Zahavi and Talvitie, 1980) a permis d'expliquer la répartition des individus en ville en montrant que ceux-ci se situaient en moyenne à une heure de trajet aller-retour de leur emploi.

Puis des modèles de micro-économie et des modèles intégrés opérationnels ont été développés pour expliquer et prévoir la formation des structures de villes. Nous allons détailler ces deux dernières approches, qui permettent de considérer quantitativement les liens entre système de transports et forme de la ville.

3.1.1 La modélisation de la ville en économie urbaine

Le modèle d'économie urbaine classique est un modèle d'optimisation de l'utilité des ménages et du profit des constructeurs. Ce modèle permet de prédire la localisation des agents dans la ville en s'appuyant sur l'idée que les localités avec une meilleure accessibilité sont plus valorisées sur le marché de l'immobilier que celles moins accessibles. La première approche développée autour de cette modélisation est celle de Von Thünen and Schumacher-Zarchlin (1875). Celui-ci s'intéressait au lien entre rente d'une terre agricole et distance à parcourir pour acheminer les produits au centre. Il a ainsi construit un modèle d'occupation des sols, qui explicite l'arbitrage entre distance au centre de la ville et loyer à payer pour les terres, ce loyer impactant la rentabilité financière des cultures.

Puis Alonso (1964) a appliqué cette approche à l'analyse des villes. Le modèle de base suppose donc que les agents arbitrent entre la distance à parcourir pour rejoindre leur lieu de travail ou de loisir et le prix du logement, ou de manière équivalente, la surface du logement, celle-ci étant proportionnelle au prix du logement. Dans ce modèle standard on suppose que la ville ne possède qu'un seul centre d'activité qui concentre tous les emplois et loisirs. Les sols et les aménités sont identiques dans toute la ville. Les consommateurs font un aller-retour par jour

au centre. Le système de transport est supposé radial et son coût est linéairement dépendant de la distance au centre. Il n'y a qu'un seul moyen de transport. Les consommateurs sont supposés identiques en terme de préférences, ils ont la même fonction d'utilité, et ont le même revenu.

Le programme du consommateur est le suivant :

$$\max_{Z,q} U(Z(r),q(r)) \quad \text{s.c.} \quad Z(r) + q(r) \cdot R(r) = Y - T(r) \quad (3.1)$$

Où r est la distance au centre, $q(r)$ est la surface du logement, $Z(r)$ est le revenu restant pour la consommation autre que le transport ou le logement, autrement dit, un bien composite, $R(r)$ est le prix du logement par unité de surface, Y est le revenu total, $T(r)$ est le coût des transports.

A l'équilibre, l'utilité retirée de la solution optimale doit être identique pour tous les consommateurs, donc en tout point de la ville. Le modèle se résout en calculant une fonction de rente d'enchère (bid rent) qui est le prix du logement maximum que chaque consommateur est prêt à payer pour habiter à une distance donnée du centre, pour un niveau d'utilité donné. En définissant la taille de la population de la ville et le prix des terres agricoles en bordure, on peut calculer la densité de consommateurs pour chaque point dans la ville.

On obtient alors une ville où le prix du logement et la densité diminuent à mesure qu'on s'éloigne du centre d'activité. Ce résultat est pertinent dans les villes monocentriques (Clark, 1951), mais devient invalide dans les villes polycentriques, où la distance au principal centre d'emploi de la ville devient non significative (Heikkila et al., 1989).

Dans le modèle d'Alonso (1964), les ménages consomment des surfaces de terrain. Mills (1967) et Muth (1969) introduisent par la suite un marché de la construction, avec des propriétaires terriens absents qui construisent plus là où les prix du logement sont élevés et moins là où ils sont faibles pour maximiser leur profit. Cela a permis de mieux décrire la ville, notamment l'offre de logement.

Les principaux enseignements de ce modèle permettent d'éclaircir le lien entre le système de transport et la structure de la ville. Tout d'abord, l'effet d'une amélioration dans les conditions de transports, qui se traduit par une réduction du coût ou de manière équivalente, du temps de transport, va entraîner une baisse du prix du logement en tous points (effet prix) car les ménages pourront se déplacer plus loin pour le même coût et la promiscuité au centre sera moins recherchée. Puis, la demande de logement va augmenter conjointement à cette baisse de prix du logement (effet revenu). L'effet total sera une diminution de la pente de la fonction d'enchère des ménages (ce qu'ils sont prêts à payer pour chaque localité). Le profil de densité de la ville s'étale, les localités périphériques deviennent plus

intéressantes. Ce mécanisme reflète les analyses du chapitre 1, montrant l'évolution de la forme de la ville suite à l'apparition de moyens de transport moins coûteux en temps, rendant plus accessibles les localités périphériques et encourageant l'étalement urbain.

Fujita (1989) décrit de manière très complète le modèle standard ainsi que ses extensions. Certaines hypothèses ont été relâchées, comme par exemple l'existence d'un seul centre d'activité. La possibilité de distinguer plusieurs classes de ménages a permis d'expliquer la répartition des revenus dans la ville. L'idée de rente d'externalité (Richardson, 1977), permet de tenir compte des préférences des individus pour les faibles densités et ainsi d'expliquer plus finement les variations de gradient de densité dans la ville. L'amélioration de la description du système de transport concerne la concurrence entre l'emprise au sol liée à l'offre de transport et celle liée à l'habitat. Elle concerne aussi la prise en compte des effets de congestion ou encore la concurrence entre les modes de transport (pour une revue étendue de ces variantes voir Masson (2000)).

Ce modèle a souvent été critiqué du fait de ses hypothèses restrictives difficilement applicables à l'étude de villes réelles, notamment l'hypothèse de monocentricité (Dubin et al., 1987).

3.1.2 Les modèles "Land Use Transport Interaction" (LUTI)

Les modèles dits "d'ingénieurs" sont construits autour d'une volonté d'aider à planifier la mobilité en ville et ont une portée opérationnelle. Ils ont été construits pour dépasser les modèles dit "à 4 étapes", destinés à modéliser les systèmes de mobilité (réseaux et flux) en raisonnant à structure urbaine constante et exogène.

Les modèles LUTI sont toujours appliqués à un territoire précis, et s'attachent à décrire les mécanismes à l'oeuvre dans ce territoire spécifique. Ces modèles ne s'inscrivent pas dans des approches unifiées et empruntent des mécanismes à plusieurs théories, ainsi que des règles et techniques venant de différentes sciences.

Le premier modèle, celui de Lowry (1964) (METROPOLIS), fusionne deux théories. La théorie de la base (Hoyt, 1954) divise les activités d'une ville en deux catégories : consommation locale et exportation. La taille de la ville dépend de sa capacité d'exportation.

Les modèles intégrés ont aussi utilisé les modèles gravitaires pour enrichir leur modélisation. Les modèles gravitaires définissent l'attractivité des localités. Ils considèrent que les interactions entre deux localités sont proportionnelles à leur taille et inversement proportionnelles à la distance (au carré du coût de transport) qui les sépare et déterminent ainsi l'attractivité de chaque localité (Wilson, 1967).

Les modèles intégrés, s'appuient parfois aussi sur les mécanismes de l'économie urbaine décrits dans la section précédente pour décrire les choix de localisation des agents.

Le plus souvent les choix de localisation sont représentés par des modèles de choix discrets (voir chapitre 2). Le choix de localisation est donc présenté comme un choix entre un nombre fini d'alternatives mutuellement exclusives. Ce choix est expliqué par les caractéristiques de la localité et du ménages, ainsi qu'une variable aléatoire, qui tient compte de la variabilité non modélisée des choix. L'équivalence entre ces modèles et les modèles gravitaires a été montrée par Anas (1983).

Les modèles intégrés les plus récents ont été réunis sous l'appellation de modèles Land Use Transport Interaction (LUTI).

Ils intègrent aussi, une description précise des réseaux de transport, des choix de transport des voyageurs et des marchandises, du trafic et de la localisation des emplois et des résidents. Parmi ces modèles, on peut citer MEPLAN (Echenique and Williams, 1980), TRANUS (De la Barra and Rickaby, 1982), METROSIM (Anas, 1982) et URBANSIM (Waddell et al., 2003). Leurs différences tiennent souvent dans le niveau de détail des variables et de leurs relations.

Pour plus de détails, Wegener and Furst (2004) proposent une revue des différents modèles qui existaient en 2004.

Les modèles sont généralement constitués de plusieurs modules qui s'articulent et peuvent être traités indépendamment ou non les uns des autres. La structure théorique de ces modèles est plus ou moins flexible. Certains modèles intègrent de nombreuses règles de décision ad hoc, qui permettent une grande précision dans la modélisation des comportements mais rendent l'architecture complexe et les mécanismes parfois difficilement lisibles.

De façon générale, ces modèles sont très précis dans la description des comportements, mais aussi très complexes et gourmands en données d'entrées (voir chapitre 5 de Saujot (2013)). Le calibrage des paramètres est essentiel dans la qualité de leurs résultats. Or, dans cette thèse, nous considérons des évolutions à long terme (2050). L'introduction d'une nouvelle technologie comme le véhicule électrique nécessite de faire des hypothèses sur certains paramètres supplémentaires et sur leurs évolutions. Si ces paramètres sont trop nombreux et les mécanismes successifs en jeu, trop complexes, la clarté et la robustesse des résultats deviennent difficiles à évaluer.

Nous choisissons donc d'utiliser le modèle d'économie urbaine standard afin de garder une vision stylisée des mécanismes à l'oeuvre et d'isoler les conditions générales sur la forme de la ville qui influencent le potentiel de réduction d'émissions des véhicules électrique. Puis dans chaque analyse nous utilisons aussi NEDUM-2D, un modèle qui se place en intermédiaire entre les modèles d'économie urbaine très stylisés et les modèles LUTI, très complexes. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux du modèle standard, pour mesurer la validité des résultats dans des villes plus proches de la réalité, notamment des villes polycentriques avec des réseaux de transports non linéaires.

3.2 NEDUM-2D

NEDUM-2D est un modèle développé au CIRED qui s'appuie sur le modèle standard d'économie urbaine (Viguié et al., 2014; Viguié and Hallegatte, 2012). Le modèle permet de simuler la distribution spatiale des loyers, de la densité de population et de construction et de la taille des logements dans le temps. Ces simulations sont faites à partir de scénarios sur les coûts des transports, la taille de la population, les revenus et les coûts de construction (Graph. 3.1). Le modèle permet de simuler des villes très simplifiées, monocentriques et circulaires ; il s'apparente alors à un modèle d'économie urbaine classique, mais permet une visualisation des résultats en deux dimensions. Il peut aussi modéliser des villes plus complexes et plus réalistes, avec par exemple plusieurs centres d'emplois et des réseaux de transports calibrés sur ceux existants.

Le modèle s'articule autour de trois mécanismes principaux. Le premier régit le choix de localisation des ménages à la manière du modèle standard. Le deuxième décrit le choix des constructeurs immobiliers (et bailleurs) de construire plus ou moins de logements en chaque point, en réaction aux prix des logements. Enfin, pour tenir compte des inerties, la version dynamique du modèle suppose des vitesses d'ajustement différentes selon les variables.

Il s'agit d'un modèle spatial, la plupart des variables sont donc associées à une répartition spatiale en deux dimensions. La ville appartient à un plan et celui-ci est découpé en cellules. Chaque variables est alors une matrice qui associe une valeur à chaque cellule.

Les variables d'entrée sont : le nombre d'emplois dans chaque centre d'emploi, les contraintes d'usage des sols, les temps et coûts de transport pour rejoindre chaque centre d'emploi et les coûts de construction. A partir de ces variables d'entrée, les variables de sortie sont calculées pour chaque cellule : la densité des ménages, le loyer, la taille des logements et le taux d'occupation des sols.

Le modèle est calibré sur l'aire urbaine de Paris (Viguié and Hallegatte, 2012). En faisant des simulations rétrospectives (de 1900 à 2010), nous pouvons observer que le modèle parvient à approcher la réalité de l'évolution de l'aire urbanisée de Paris de manière satisfaisante (Graph.3.2).

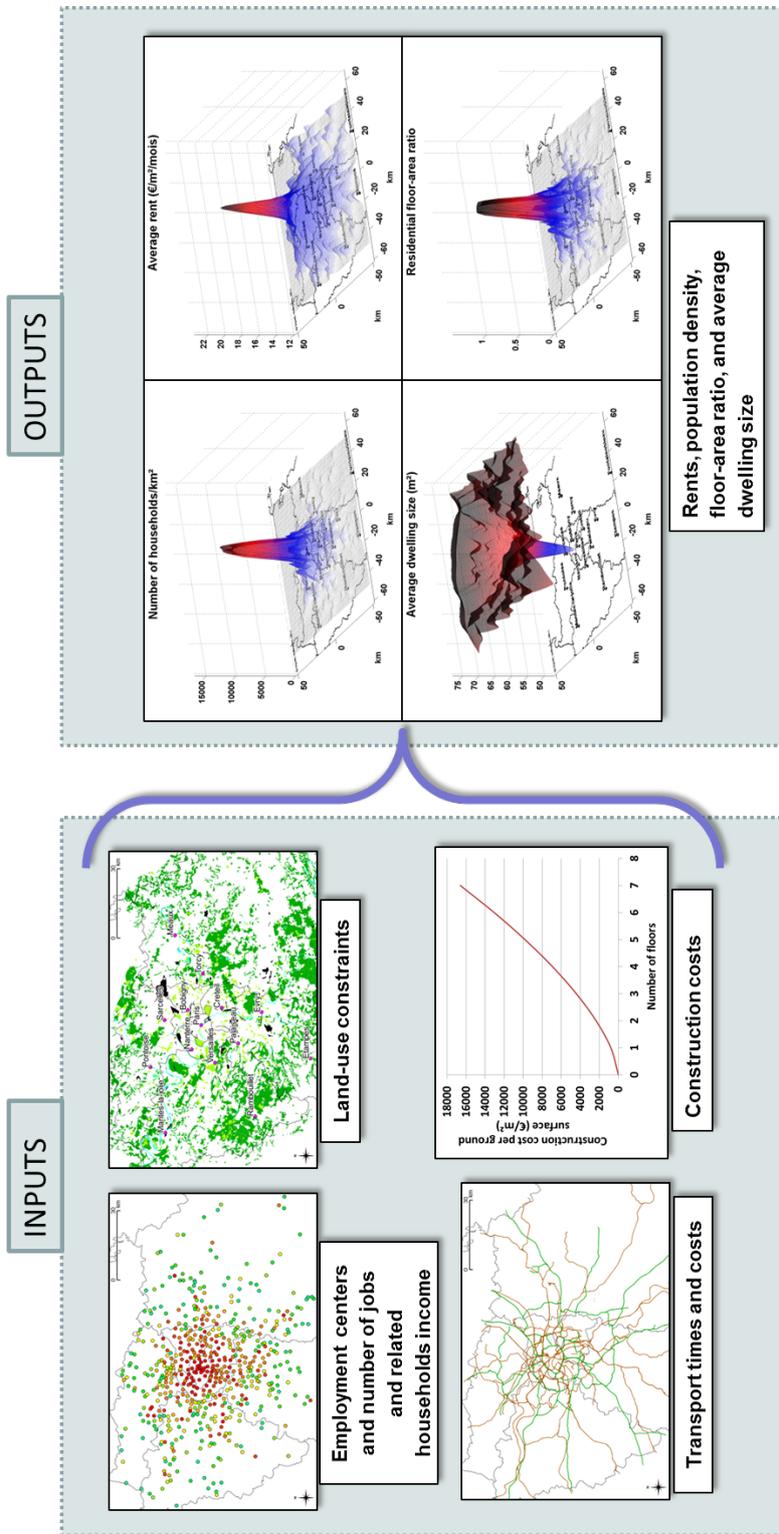


FIGURE 3.1 – Variables d’entrée et de sortie du modèle NEDUM-2D (Source : Notice NEDUM-2D)

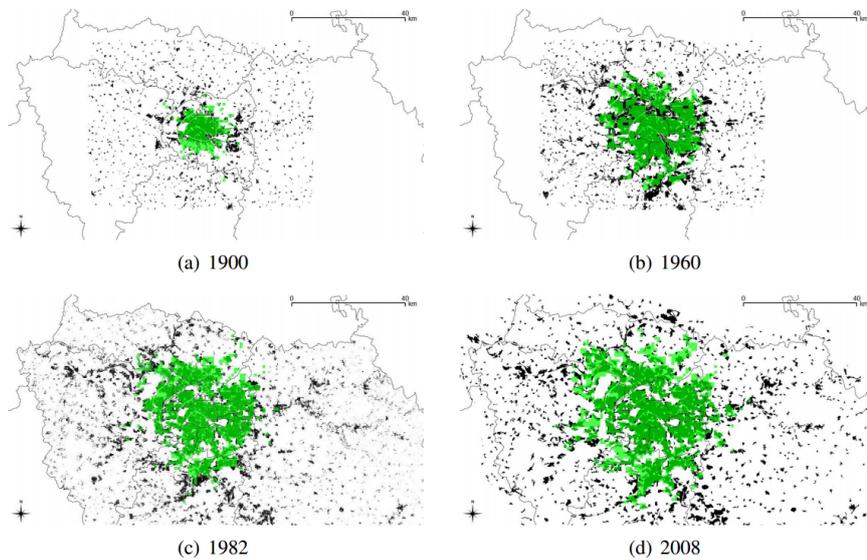


FIGURE 3.2 – Emprise au sol de l’aire urbaine de Paris constatée (en noir) et simulée avec NEDUM-2D (en vert) (Source : Notice NEDUM-2D)

Dans les chapitres à suivre, nous avons utilisé la version statique de NEDUM-2D, qui calcule l’équilibre de la ville pour une année donnée dans le futur. Le mécanisme prenant en compte l’inertie du système ville n’est donc pas à l’oeuvre dans les simulations utilisées. Nous avons fait ce choix par soucis de simplification. La version dynamique demande des scénarios sur les trajectoires des variables exogènes. Le temps de résolution est aussi plus long. Enfin, pour les scénarios de long terme, à moins de s’intéresser à des scénarios de rupture sur les variables d’entrée (par exemple une forte chute de la population), la simulation obtenue pour une année donnée est sensiblement la même en statique ou en dynamique.

3.2.1 Les équations du modèle

En nous appuyant sur la thèse de Viguié (2012), nous reprenons les équations de la version statique de NEDUM-2D. La fonction d’utilité utilisée pour les ménages a la forme suivante :

$$U(r) = Z(r)^\gamma q(r)^\theta \quad (3.2)$$

Où r est la distance au centre, γ et θ sont des coefficients tels que $\gamma + \theta = 1$, $q(r)$ est la surface du logement et $Z(r)$ est le revenu restant pour la consommation autre que le transport ou le logement.

La contrainte de revenu est la suivante :

$$Z(r) + q(r) \cdot R(r) = Y - T(r) \quad (3.3)$$

Où $R(r)$ est le loyer par unité de surface, Y est le revenu total et $T(r)$ est le coût des transports. Le coût des transports inclut le prix du déplacement et le coût du temps nécessaire au déplacement.

On suppose que les propriétaires terriens combinent du capital $K'(r)$ et du terrain $L'(r)$ pour produire du logement $H'(r)$. La fonction de production est alors la même que dans le modèle de Muth (1969) :

$$H'(r) = AL'(r)^a K'(r)^b \quad (3.4)$$

Où A , a , b sont des coefficients et $a+b = 1$.

Les propriétaires terriens maximisent donc leur profit exprimé ainsi :

$$\Pi = (R - R_0)H'(r) - (\delta + \rho)K'(r) \quad (3.5)$$

Où ρ résume la dépréciation du capital et les taxes payées sur le capital et δ le taux d'intérêt. En chaque point de la ville, les propriétaires terriens choisissent $K'(r)$ pour maximiser leur profit avec pour contrainte un ratio de construction par terrain, correspondant à des contraintes d'urbanisme présentes dans la réalité, telles que la hauteur des immeubles, l'interdiction de construire dans les parcs, ou la surface de voirie. Les limites de la ville sont alors définies par un loyer minimum, correspondant par exemple au loyer des terres agricoles (R_0).

En raisonnant par unité de terrain, et en définissant $H(r) = \frac{H'(r)}{L'(r)}$ et $K(r) = \frac{K'(r)}{L'(r)}$, nous pouvons écrire la fonction de production ainsi :

$$H(r) = A(K(r))^b \quad (3.6)$$

3.2.2 Hypothèses et paramètres

Plusieurs hypothèses simplificatrices sont faites. Tout d'abord nous ne considérons qu'une seule classe de ménages, avec un revenu identique. Le modèle ne

permet donc pas de considérer la répartition des ménages dans la ville, selon le loyer qu'ils peuvent payer et les transports qu'ils peuvent utiliser.

Ensuite, le logement social n'est pas modélisé. La construction du logement résulte exclusivement des mécanismes de marché.

Enfin, nous supposons un aller-retour par personne et par jour au centre d'emploi.

Les paramètres et données utilisés sont ceux définis dans la thèse de Viguié (2012). Ils correspondent à la modélisation de l'aire urbaine de Paris. Nous les retrouvons dans le tableau 3.3.

Input data	Value
Urban area population	5,101,300 households
Fraction of ground surface devoted to housing	0.62
Households average income	56,098 €
Interest rate	$\delta = 5\%$
Built capital depreciation time	$\rho = 0.5\%$

Summary of input data

Calibrated parameters	Value
Households utility function parameter	$\gamma = 0.7$
Coefficients of construction cost function	$A = 2.0140$ and $a = 0.36$
Cost associated with travel time	105%
Rent determining city border	$R_0 = 11 \text{ €/m}^2$
Maximum floor-area ratio	1.5

Summary of calibration parameters

FIGURE 3.3 – Données et paramètres calibrés dans NEDUM-2D (Source Viguié (2012))

Certains paramètres comme les paramètres de la fonction d'utilité, les coûts de construction et le coût du temps ont été calibrés afin d'obtenir une simulation cohérente avec la structure urbaine de 2008 (Fig.3.2).

Le coût du temps est un élément central du choix du mode de transport, car il s'ajoute au coût financier. Nous précisons à nouveau les valeurs de ce paramètre. Ce paramètre a été calibré sur l'Ile de France par Viguié (2012). Ce coût du temps correspond à 105% du salaire horaire.

Dans son travail, Viguié (2012) souligne que la sensibilité de la plupart des variables calculées aux paramètres choisis et calibrés est plutôt faible. Les élas-

ticités des variables calculées aux variables d'entrée sont comprises entre 0.1% et 1% environ. Une faible modification de chaque paramètre n'entraîne pas de grande variation dans les résultats. Ceci suggère que le modèle est stable.

La modélisation des transports faite dans cette thèse, implique l'ajout d'autres paramètres, comme ceci est détaillé dans la section suivante.

3.3 Le module de transports intégré à NEDUM-2D

3.3.1 Description du module

Plusieurs modèles se sont intéressés à l'introduction du véhicule électrique en ville. Par exemple, le modèle MARS (Mousseau et al., 2012) mesure l'influence de plusieurs politiques sur les transports (subventions, parking payant, offre de transport en commun...) en modélisant la ville de Mulhouse. Les scénarios avec une plus grande part de véhicules électriques entraînent une augmentation du volume de mobilité et une réduction des émissions de gaz à effet de serre de la ville. Cependant dans cette modélisation les taux de pénétration sont exogènes dans les scénarios.

Pour endogénéiser les choix de technologies et de modes de transport, nous avons développé un module de transport qui s'appuie sur le calcul du coût total de possession des véhicules et le modèle de choix discret logit multinomial (voir chapitre 2).

La zone étudiée (ici la ville) est découpée en cellules et à chaque cellule est associée un temps pour rejoindre le ou les lieux d'emploi. Nous faisons le choix de n'étudier que les déplacements pendulaires et nous faisons donc l'hypothèse que chaque agent fait un aller-retour par jour au centre d'emploi. Nous supposons aussi que chaque agent ne peut disposer que d'un seul véhicule.

Dans chaque cellule nous calculons tout d'abord les ATCO (Annual total cost of ownership) pour un déplacement en voiture pour trois technologies différentes : le véhicule essence, le véhicule diesel et le véhicule électrique.

Le véhicule électriques est le plus cher des trois à l'achat et le véhicule essence est le moins cher. Le véhicule électrique est celui qui consomme le moins d'énergie et le véhicule essence celui qui consomme le plus de carburant.

NEDUM-2D permet de simuler des villes réalistes mais aussi des villes fictives, très stylisées. C'est ce que nous faisons dans un premier temps, afin de mieux illustrer les mécanismes décrit ci-dessus. Dans sa version monocentrique et circulaire, NEDUM-2D s'apparente à un modèle d'économie urbaine standard tel que décrit dans la première section de ce chapitre.

Nous considérons donc une ville circulaire avec des temps de transport dépendant linéairement de la distance au centre. On obtient la fonction de coût total (ATCO et coût du temps) du transport schématisée dans la figure 3.4. Avec L_{PT} la distance jusqu'à laquelle les transports en commun sont avantageux et à partir de laquelle le véhicule diesel ou essence devient avantageux. Cette valeur dépend des paramètres influençant le coût, mais les transports en commun étant généralement plus lents que le véhicule privé, le coût du temps les cantonne à de courtes distances. L_{CC} est la distance à partir de laquelle le véhicule électrique devient avantageux, L_{EV} est la distance à partir de laquelle l'autonomie du véhicule électrique ne permet plus de faire un aller-retour au centre et le véhicule essence ou diesel est à nouveau utilisé.

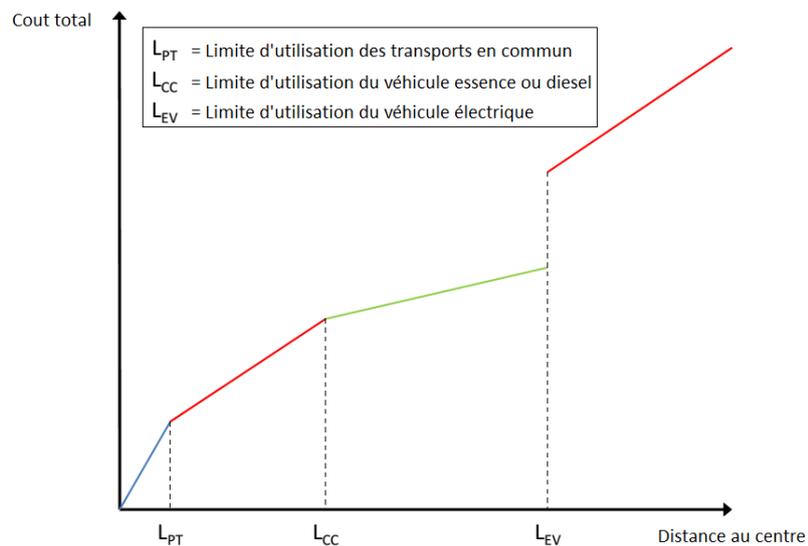


FIGURE 3.4 – Schéma du coût du transport en fonction de la distance au centre. Chaque couleur correspond à une pente différente.

La figure 3.5 décrit le fonctionnement du module de transport et son intégration dans le modèle d'économie urbaine standard.

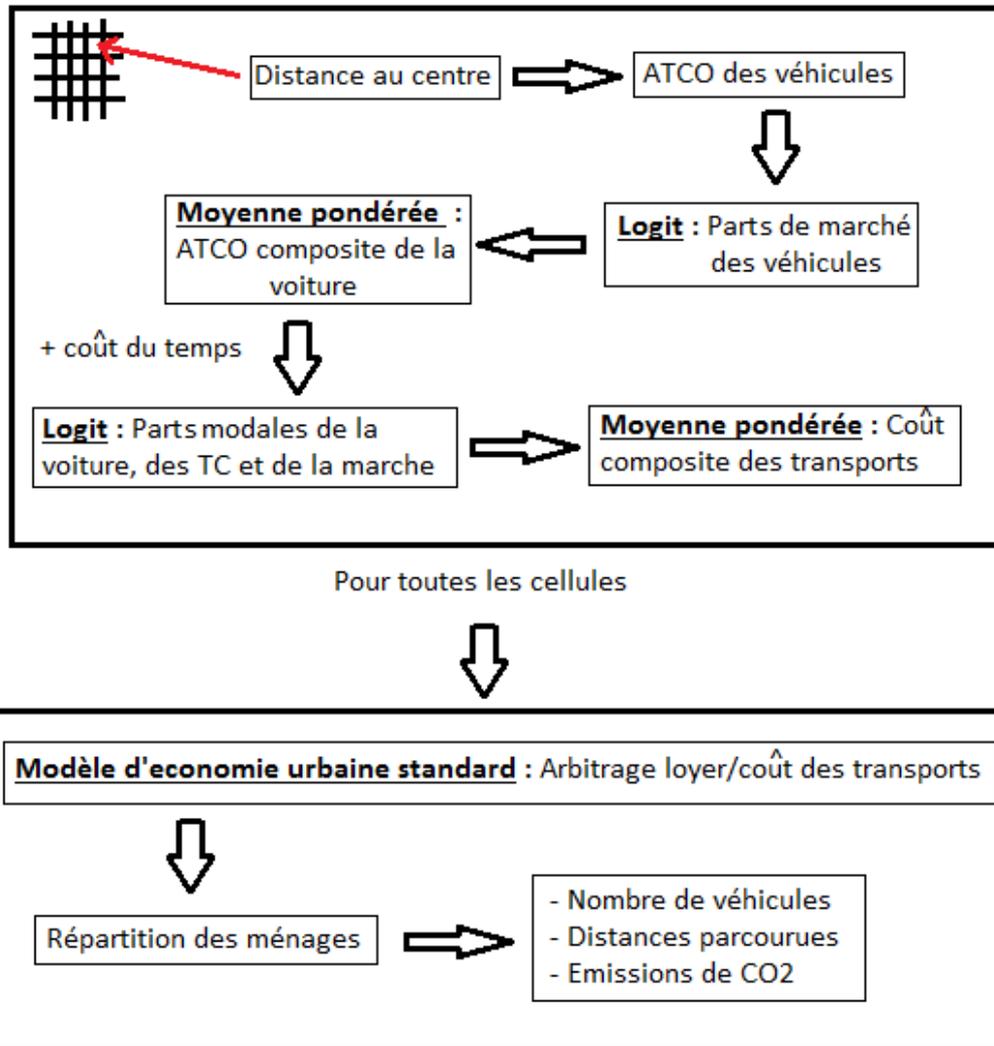


FIGURE 3.5 – Schéma d’intégration du module de transport au modèle d’économie urbaine standard.

Le module de choix du véhicule dans chaque cellule s’appuie alors sur le modèle de choix discret multinomial décrit en chapitre 2.

Le modèle de choix discret permet, comme nous l’avons vu précédemment, de tenir compte de la variabilité des choix.

Le paramètre du logit utilisé (α) représente la sensibilité des ménages aux écarts de coût dans leur choix. Autrement dit ce paramètre tient compte de l’importance d’autres caractéristiques qui peuvent entrer en compte dans le choix du véhicule. Il est important de garder en mémoire l’influence de ce paramètre sur les

parts de marché de chaque technologie. Un paramètre logit faible (aux alentours de 1) lisse les choix de véhicule. Autrement dit, même si un véhicule est moins cher il ne sera pas systématiquement choisi par tous les ménages. Un paramètre de logit fort (par exemple 10), entraîne des choix plus contrastés, le coût jouant un rôle plus important dans les probabilités de choix des véhicules.

Les résultats de ce module de choix (coût et part de marché de chaque véhicule) sont ensuite introduits dans le calcul du choix du mode de transport qui s'appuie aussi sur un modèle de logit multinomial. On considère trois modes de transports : le véhicule privé, le transport en commun et la marche à pied.

Dans chaque cellule, le coût du véhicule privé est calculé comme la moyenne des ATCO pondérée par les parts de marchés issues du logit.

Ce coût moyen du véhicule privé est ensuite comparé au coût des autres modes de transports. Les parts de marché résultent d'un logit sur les coûts des différents modes de transport pour chaque localisation.

Les parts de marchés de chaque mode et chaque technologie sur la ville entière sont calculées à partir de la répartition de la population dans l'ensemble des cellules.

Nous avons donc choisi de modéliser de manière séquentielle le choix du véhicule et le choix du mode. Si toutes les alternatives étaient considérées sur le même plan, l'ajout ou le retrait d'une alternative, comme le véhicule électrique, aurait un impact direct sur l'utilisation des autres alternatives, comme les transports en commun. Ainsi, plus nous rajouterions d'alternatives, plus les parts de marché des autres diminueraient. En utilisant une modélisation séquentielle, nous réduisons l'impact de l'ajout d'une technologie, telle que le véhicule électrique, sur l'utilisation des autres modes. Cet effet peut toujours être présent dans le modèle, via l'impact de l'introduction du véhicule électrique sur le coût total du véhicule privé, mais il est atténué. Cette modélisation séquentielle est adoptée par la plupart des modèles de logit multinomial décrit dans le chapitre 2.

Les émissions de CO₂ associées sont calculées en fonction des distances effectuées avec chaque type de moyen de transport.

3.3.2 Premières analyses

Le modèle d'économie urbaine NEDUM-2D ainsi équipé d'un module de transport, nous permet d'étudier les interactions entre la localisation des ménages (la forme de la ville) et les moyens de transport disponibles, notamment l'introduction d'une nouvelle technologie comme le véhicule électrique.

Pour cela, nous avons besoins d'hypothèses sur les prix et consommation des différentes alternatives de véhicules. Elles sont décrites dans le tableau 3.1.

	Essence	Diesel	Électrique
Coût (€)	9 000	11 000	15 000
Consommation carburant(L/100km)	6.7	5.4	0
Consommation électricité (kWh/100km)	0	0	20
Prix du carburant en 2015 (en €/l ou /kWh)	1.23	1.11	0.14
Coût du kilomètre en 2015 (en €/100km)	8.2	5.9	2.8
Prix du carburant en 2050 (en €/l ou /kWh)	2.14	1.92	0.20
Coût du kilomètre en 2050 (en €/100km)	14.3	10.3	4

TABLE 3.1 – Caractéristiques des véhicules et prix des énergies en 2015 et scénario pour 2050.

Dans l'ensemble des analyses nous avons supposé une autonomie du véhicule électrique de 100km. Cette valeur est inférieure à l'autonomie réelle des derniers modèles (150-170km) mais ce choix nous permet de tenir compte de l'anxiété liée à la capacité de la batterie qui a été observée par plusieurs études (Lieven et al., 2011; Franke et al., 2012).

On voit alors sur la figure 3.6, que la zone d'utilisation du véhicule électrique dans une ville forme une couronne autour du centre de la ville, dans le cas simple d'une ville monocentrique et circulaire et en l'absence de logit ou de manière équivalente avec un logit très élevé. En effet, si les distances parcourues pour aller au centre ne sont pas suffisantes, le véhicule électrique n'est pas intéressant financièrement. Ce schéma résulte directement de l'hypothèse discutée dans le chapitre 2 qui fait reposer le choix du véhicule sur l'ATCO. En intégrant des considérations plus pratiques (place de parking, nombre de véhicule du ménage, parcours pendant les vacances etc...) en Ile de France, Windisch (2011) montre aussi que le véhicule électrique est plus pertinent en Grande Couronne de Paris.

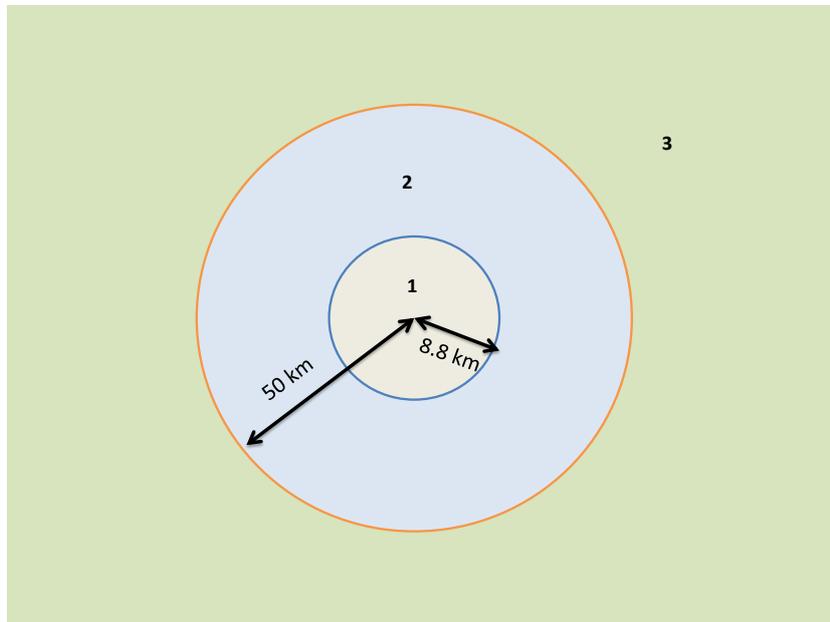


FIGURE 3.6 – Couronne d'utilisation du VE en 2050

En présence d'un logit, la limite entre les zones 1 et 2 de la figure 3.6 est progressive et forme un dégradé où la part du véhicule électrique augmente à mesure qu'on s'éloigne du centre.

Si les prix du véhicule électrique diminuaient, toutes choses égales par ailleurs, la zone 1 du schéma se réduirait. Si l'autonomie de ce véhicule augmentait, le cercle 2 s'étendrait.

Les variations d'ATCO, ont des répercussions sur la forme de la ville. Par exemple, une hausse du prix du carburant fossile, entraîne une contraction de la ville car elle augmente le coût moyen du transport. Creutzig (2014) trouve le même résultat en montrant que la ville se contracte d'autant plus que la densité rend les transports en commun viables.

Autre exemple, la baisse du prix du véhicule électrique engendre un étalement de la ville, en rendant moins chères des localités éloignées.

La suppression du réseau de transport en commun et l'augmentation de la vitesse de la voiture accroît l'étalement urbain. Le modèle nous permet donc de représenter les grandes villes étalées, tournées vers les transports privés, où le déploiement des routes favorise la circulation en voiture. Inversement, en réduisant l'accessibilité (vitesse) de la voiture et en mettant en place un réseau de transport en commun efficace, il nous permet de représenter les villes plus denses.

3.3.3 Limites

Une des principales limites de cette modélisation est l'absence de congestion, particulièrement dans les transports privés. Dans notre modèle, le nombre de véhicules circulant n'influence pas la vitesse de ce mode de transport. Pour de nombreuses villes réelles, la congestion est un frein à l'utilisation des transports privés car elle augmente le temps de parcours (IPCC et al., 2014b). Son impact sur la pollution est aussi loin d'être négligeable puisqu'elle augmente la durée d'utilisation de la voiture.

Si le véhicule électrique peut être une solution pour réduire cette pollution, il faudrait pouvoir tenir compte d'une éventuelle impossibilité du report modal des transports en commun vers la voiture électrique, due à la saturation des réseaux routiers. De plus, ce report modal, s'il n'est pas négligeable, pourrait augmenter la congestion et ainsi les émissions liées au moteur thermique (Bento et al., 2014).

Cependant, dans les différents exercices de cette thèse, l'introduction du véhicule électrique ne modifie la répartition entre véhicule privé et transports en commun que très marginalement. La part modale des transports en commun varie de 1 point de pourcentage au plus, en présence du véhicule électrique. On peut donc considérer qu'il n'augmente pas la congestion.

Une autre limite est l'hypothèse simplificatrice d'un aller-retour au centre par agent. Cette hypothèse ne tient donc pas compte des trajets exceptionnels (départs en vacances, déplacements professionnels longue distance...). Ceci pourrait jouer en défaveur du véhicule électrique, qui n'est pas capable d'effectuer de longs trajets sans recharger.

Malgré ces limites, le modèle NEDUM-2D équipé du module de choix des véhicules, nous permet d'analyser les interactions entre l'introduction du véhicule électrique et la forme urbaine. Ces analyses vont nous permettre de distinguer les villes dans lesquelles ce véhicule permet de réduire le plus les émissions.

Chapitre 4

Potentiel de réduction des émissions du véhicule électrique et formes urbaines

4.1 Le véhicule électrique en ville

Nous avons détaillé dans le premier chapitre, le lien entre forme urbaine et système de transports. La forme urbaine influence le système de transports et inversement le système de transports influence la croissance urbaine. Certaines formes de ville sont donc associées à certains systèmes de transport. Ainsi, la ville étalée est associée aux transports privés, aux déplacements longs et donc à de plus fortes émissions de CO₂. Inversement, les villes compactes sont associées à des déplacements en transports en commun, sur des distances plus courtes, donc à des niveaux d'émissions plus faibles. La compacité est donc mise en avant comme solution pour endiguer la hausse des émissions liées aux transports en ville .

Mais les villes existantes ne peuvent être détruites, et la plupart d'entre elles sont déjà étalées et tournées vers la voiture (voir section 1.3.2). D'autres villes sont en pleine expansion, dans les pays en développement notamment, et les perspectives d'évolution s'accordent sur un accroissement de l'étalement urbain (IPCC et al., 2014a). Les nouvelles technologies de véhicule privé, comme la voiture électrique, apparaissent alors comme des solutions pertinentes pour faire baisser les émissions dans ces villes (McCollum et al., 2014).

Jusqu'à présent, le lien entre forme urbaine et système de transports a surtout été étudié au travers du lien entre politiques jouant sur le levier "structure de la mobilité" et la forme urbaine. En effet, les politiques de réduction d'émissions appartenant à ce levier influencent le volume de transports et le choix des modes,

qui sont eux même en lien avec les schémas de déplacements et donc avec la forme urbaine.

Or une meilleure compréhension des interactions entre des politiques appartenant au levier "technologique" et la forme urbaine est nécessaire pour la mise en oeuvre de ces politiques. Cela permettrait de différencier les caractéristiques des villes qui influencent le potentiel de réduction associé à ces politiques.

Dans le cas du véhicule électrique, le potentiel de réduction d'émissions associé au déploiement de cette technologie dans les villes va dépendre de son adoption et de son utilisation. Les schémas de déplacements et la forme des villes auront donc un impact sur ce potentiel. Inversement, l'utilisation de cette nouvelle technologie devrait aussi modifier la forme urbaine.

Dans la littérature, les évaluations du potentiel de réduction d'émissions qu'offre l'utilisation du véhicule électrique diffèrent selon les analyses. Le dernier rapport du GIEC calcule (IPCC et al., 2014b) que le véhicule électrique pourrait réduire de 70% environ les émissions par kilomètre parcouru en 2030 par rapport au véhicule conventionnel dans les pays de l'OCDE. Hawkins et al. (2013) calculent que le véhicule électrique peut permettre une réduction des émissions entre 10 et 25% en Europe selon les scénarios.

Ces études portent sur des territoires différents ce qui peut en partie expliquer leurs divergences. Toutefois au sein de chaque étude les différences d'organisation spatiale du territoire étudié, et donc les habitudes de déplacements, sont rarement prises en compte. Brady and O'Mahony (2011) montrent dans le cas de la ville de Dublin, que le véhicule électrique pourrait éviter entre 3 et 10% des émissions, selon les scénarios. Ils tiennent compte des habitudes de déplacements en considérant que seuls les ménages possédant deux voitures et parcourant des distances inférieures à l'autonomie du véhicule électrique seraient intéressés par ce véhicule.

Nous supposons ici que le potentiel de réduction du véhicule électrique diffère selon les schémas de déplacements des ménages et donc la forme urbaine dans laquelle il est utilisé. Nous nous concentrons sur deux attributs de la forme urbaine. Nous identifions l'influence du profil de densité et de l'existence de plusieurs centres d'emploi sur le potentiel d'émissions évitées par le véhicule électrique dans les villes. Ces deux attributs ont un lien direct avec les schémas de déplacements des ménages comme nous l'avons vu dans le chapitre 1.

Les résultats montrent que selon les villes, le potentiel de réduction d'émissions associé au véhicule électrique, au total et par véhicule en circulation, diffère. Ce résultat implique que les efforts des politiques pour développer le véhicule électrique devraient être différenciés sur le territoire et être orientés vers les villes où ce véhicule a le plus d'impact.

Dans un premier temps nous allons détailler la méthode utilisée pour évaluer l'influence de la répartition des ménages sur le potentiel de réduction d'émissions

du véhicule électrique. Puis nous présenterons les résultats principaux. Enfin, nous proposerons des résultats complémentaires sur la répartition des efforts de déploiement des bornes de recharge au sein de la ville ainsi que sur la répartition des efforts à l'échelle nationale entre les villes.

4.2 Méthode : étude de trois villes stylisées et d'une ville existante

Potentiel de réduction d'émissions

Il convient de préciser les contours de la notion de potentiel de réduction d'une solution. Le potentiel de réduction peut se définir dans le temps : réduction entre deux dates données. Il peut aussi se définir par rapport à un autre scénario, à une date donnée : réduction entre un monde où rien n'a été fait pour réduire les émissions et un monde où des mesures ont été prises. Il s'agit alors d'émissions évitées entre deux visions du futur. C'est cette dernière notion que nous retiendrons pour la suite des analyses. Enfin, le potentiel peut être calculé en valeur absolue ou en proportion (pourcentage). Nous calculerons ici le potentiel de réduction en pourcentage afin de pouvoir comparer des villes de taille différentes.

Villes circulaires monocentriques

Pour comparer les interactions entre la forme de la ville et l'introduction d'une nouvelle technologie, nous commençons par étudier des villes théoriques d'une forme simple. Ces villes stylisées ne sont pas réalistes, mais nous permettent d'isoler l'influence de certaines de leurs caractéristiques sur l'effet de l'introduction du véhicule électrique.

Nous supposons des villes avec un seul centre d'emploi (monocentriques) et parfaitement circulaires : les coûts de transports dépendent uniquement de la distance au centre et de la vitesse du mode utilisé. Cette configuration de ville nous permet d'étudier différents profils de densité en faisant varier la taille de la population et le coût des différents modes de transports. Tous les autres paramètres restent identiques.

Nous nous plaçons dans le cadre d'un modèle d'économie urbaine standard, auquel nous ajoutons le module de transport décrit dans le chapitre précédent. Ce module de transport décrit les choix du véhicule et du mode de transport comme le résultat de la comparaison de leurs coûts d'achat et d'usage.

Afin de mesurer l'impact du véhicule électrique sur différentes villes, nous imaginons trois villes fictives avec des tailles de population et des réseaux de transport distincts.

La première ville a une population de 10 millions d'habitants et un réseau de transport en commun. Nous l'appelons BigPT, pour "Big city with Public Transport". Nous choisissons cette taille de population afin de pouvoir comparer, par la suite, les résultats obtenus avec cette ville à ceux obtenus avec une simulation de l'Ile de France (ville polycentrique).

Pour tester l'effet de la taille de la population, nous modélisons une deuxième ville dix fois plus petite (un million d'habitants), avec un réseau de transport en commun. Nous l'appelons SmallPT pour "Small city with Public Transport" par opposition avec la grande ville. Cette ville n'est pas petite dans l'absolu. Nous ne choisissons pas une ville plus petite car nous souhaitons garder un réseau de transports en commun comparable à celui de BigPT (même vitesse de déplacement et même concentration des stations), ce qui serait moins pertinent dans une ville de plus petite taille.

Cependant, d'autres tailles de population seront testées dans les analyses dans la section 4.4.

Pour tester l'effet de la présence d'un réseau de transports en commun, nous choisissons de modéliser une troisième ville qui est une ville de dix millions d'habitants comme BigPT, mais avec un réseau de transport en commun inexistant (vitesse nulle des transports en commun), et où les déplacements en voiture sont plus rapides et donc dominants (la marche à pied est prise en compte dans le modèle). Nous l'appelons BigCars pour "Big city with Cars". La congestion n'est pas prise en compte dans le modèle, cette ville est donc une ville fictive dans laquelle les voitures circulent sans ralentissements.

Ces trois villes sont fictives mais peuvent être rapprochées de villes existantes. La ville BigPT peut être rapprochée de certaines métropoles, dotées d'un réseau de transport en commun, comme la région parisienne. La ville SmallPT peut être rapprochée de plus petites agglomérations, possédant un réseau de transports en commun (Prague, Riga, Lille, Cologne...). La ville BigCars quant à elle, peut être considérée comme une approximation des métropoles où le transport en voiture domine mais qui restent monocentriques. Ce schéma de ville se retrouve le plus souvent dans les grandes villes des pays en développement (Téhéran, Le Caire...), même si dans la plupart, l'hypothèse monocentrique peut être discutée.

Ces trois villes nous permettent de faire varier alternativement un seul des deux paramètres de la forme urbaine définis dans la section précédente. Elles ne sont pas représentatives des villes de manière exhaustive. La principale limite aux comparaisons avec des villes réelles étant l'hypothèse monocentrique. Nous avons fait le choix de ne modéliser que trois villes. Nous avons testé d'autres villes appartenant au continuum de villes fictives que l'on peut modéliser en faisant varier la vitesse des transports en commun et la taille de la population entre les paramètres choisis ici. Nous avons obtenu des résultats intermédiaires à ceux exposés.

De même, la ville fictive SmallCar, petite et sans transport en commun, a été testée mais n'est pas présentée dans les résultats. Les simulations nous ont montré que les résultats pour cette ville se situent entre ceux de SmallPT et BigPT. L'effet des transports en commun sur une petite ville et sur une grande ville va dans le même sens et répond au même mécanisme, que nous détaillerons dans la section 4.3. Nous avons donc choisi de ne le montrer que pour BigCar.

Les tailles de population et les réseaux de transport décrits ci-dessus nous permettent de simuler les profils de densité à l'équilibre pour les trois villes fictives (densité en fonction de la distance au centre). Les profils de densité sont représentés dans la figure 4.1. Il s'agit des profils de densité en l'absence de véhicule électrique.

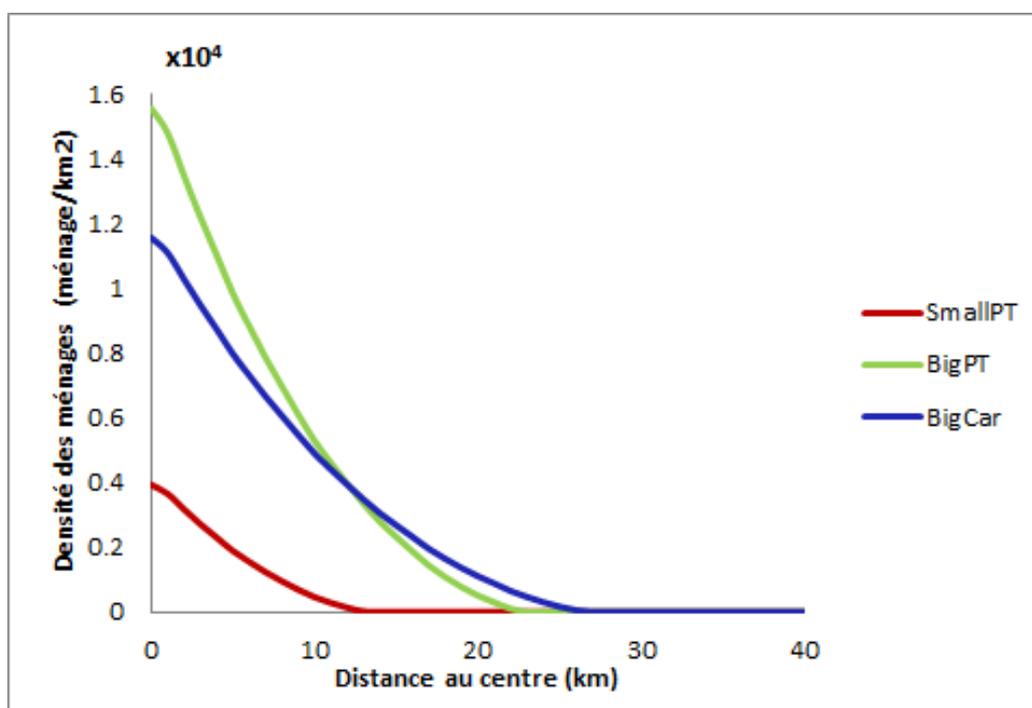


FIGURE 4.1 – Profil de densité de trois villes fictives

On voit que du fait de l'efficacité des déplacements en voiture, la ville BigCars est plus étalée. Sa densité au centre est plus faible que celle de la ville BigPT. La ville SmallPT est quand à elle plus petite et moins dense en tous points.

Pour analyser l'impact de l'introduction du véhicule électrique, nous comparons chaque ville dans deux mondes différents. Un premier monde où le véhicule électrique est disponible à large échelle et un deuxième où il ne l'est pas. Dans

le monde où le véhicule électrique est disponible, nous supposons que les efforts nécessaires ont été faits pour rendre ce véhicule utilisable par tous (point de recharge disponibles, recharge rapide, baisse du coût, électricité peu chère et décarbonée...). Le prix du véhicule électrique est fixé à 15 000 €. Aujourd'hui le prix du véhicule électrique en France avoisine les 25 000 €, bonus écologique déduit. Cette baisse de prix peut être interprétée comme résultant de la baisse des coûts de production (voir chapitre 1), et du maintien du bonus écologique. Le véhicule électrique n'est pas disponible à large échelle actuellement et son introduction ne sera pas instantanée. Les équilibres que nous calculons avec ce modèle de ville correspondent donc à des villes futures, à l'horizon 2050.

Pour chacun de ces mondes, nous calculons l'équilibre statique de la ville afin de pouvoir comparer les différences de changement de forme, d'adoption du véhicule électrique et d'émissions évitées.

NEDUM-2D en Ile de France

Dans un second temps, nous allons nous intéresser à l'influence du polycentrisme sur le potentiel de réduction d'émissions du véhicule électrique en ville. Jusqu'à présent les villes étudiées étaient monocentriques et circulaires. Or, la vision monocentrique des villes est de moins en moins pertinente pour expliquer leur structure. Heikkila et al. (1989) montrent, par exemple, qu'à Los Angeles, la distance au centre d'affaire historique n'est pas significative pour expliquer le prix des logements, alors que d'autres nouveaux centres le sont. Ils interprètent leurs résultats comme un indice du déclin du modèle monocentrique.

Pour s'approcher un peu plus de la réalité, nous utilisons le modèle NEDUM-2D qui nous permet d'étudier une ville polycentrique et calibrée sur une ville existante (ici l'Ile de France). Les contraintes sur l'utilisation des sols, les coûts de construction et les temps de transports utilisés sont ceux relevés pour l'aire urbaine de l'Ile de France. Cette analyse va nous permettre d'observer si l'effet constaté pour des villes monocentriques circulaires se retrouve dans une ville plus réaliste. En effet l'Ile de France est comparable, en terme de réseau de transport en commun et de taille de la population, à la ville BigPT.

La disponibilité du véhicule électrique n'est pas encore une réalité en Ile de France. Nous proposons donc un scénario à l'horizon 2050 afin d'étudier la possibilité de l'introduction du véhicule électrique à grande échelle. Le scénario utilisé pour les paramètres est un scénario central qui s'appuie sur les scénarios BAU de l'EIA (EIA, 2013). Les détails de ce scénario sont disponibles dans l'article en annexe 2.

4.3 Résultats : le véhicule électrique évite plus d'émissions dans les grandes villes étalées et augmente l'étalement urbain

Villes monocentriques circulaires

La figure 4.2 représente le pourcentage de variation de densité en chaque point des trois villes entre le monde avec véhicule électrique et le monde sans. En bleu figurent les zones où la densité augmente avec l'introduction du véhicule électrique et en rose, celles où la densité diminue.

Au centre de la ville la densité diminue toujours avec l'arrivée du véhicule électrique et elle augmente en bordure, mais cet effet est surtout visible dans la ville BigCars.

Le véhicule électrique renforce l'étalement urbain dans les trois types de ville. Ce résultat vient de la modification de la fonction de coût engendrée par l'introduction du véhicule électrique. En effet, celui-ci rend les trajets en voiture dans les localités éloignées du centre plus abordables. Mais c'est dans la ville la plus étalée que celui-ci renforce le plus cet étalement car les localités éloignées et abordables sont aussi plus accessibles en voiture que dans les autres villes. En effet, nous avons supposé que dans la ville étalée, les transports en voitures sont favorisés et donc plus rapides.

En comparant l'impact de la disponibilité du véhicule électrique sur les émissions dans les trois villes (tab.4.1), nous constatons que c'est aussi dans la ville BigCars que l'effet est le plus visible. C'est donc dans la ville la plus étalée que le véhicule électrique permet d'éviter le plus d'émissions, car le véhicule électrique est plus utilisé et remplace des trajets plus longs que dans les autres villes, comme le confirme le tableau 4.2.

	SmallPT	BigPT	BigCar
Variation des émission de CO ₂ suite à l'introduction du VE	-26%	-33%	-36%

TABLE 4.1 – Variations des émissions de CO₂ induites par la disponibilité du véhicule électrique dans trois villes monocentriques circulaires

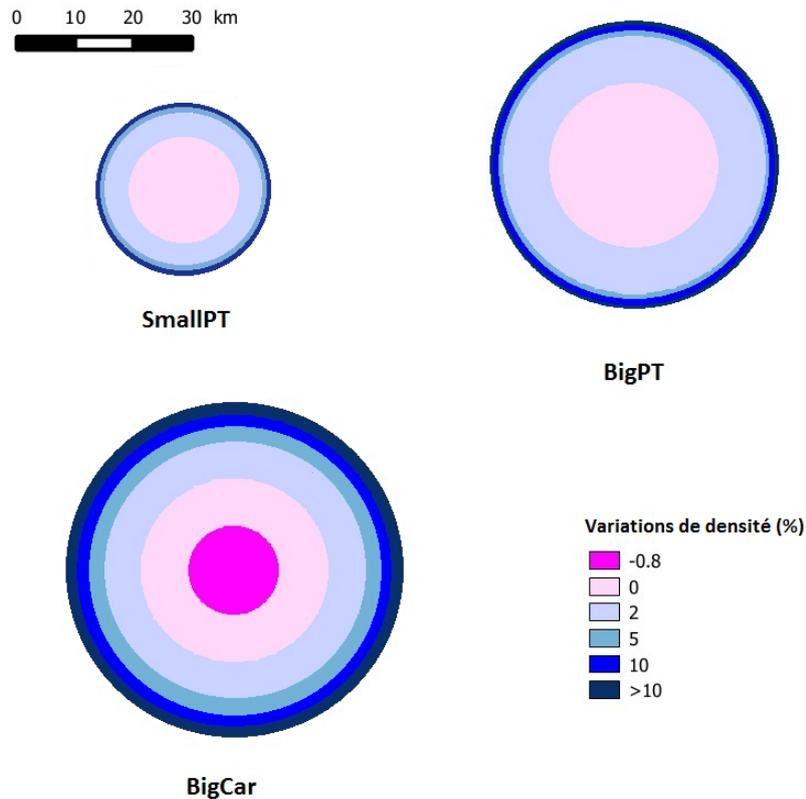


FIGURE 4.2 – Variations de densité induites par la disponibilité du véhicule électrique dans trois villes fictives.

Émissions de CO₂ évitée par un véhicule électrique

Une autre façon de présenter les différences d'influence du véhicule électrique sur les émissions évitées est de calculer le potentiel de réduction d'émission par véhicule, dans les trois villes. Le tableau 4.3 rapporte la quantité de CO₂ qu'un véhicule électrique permet d'éviter dans chaque ville. Dans la grande ville étalée, le véhicule électrique permet d'éviter deux fois plus d'émissions que dans la petite ville. En effet, un véhicule électrique est plus utilisé dans une grande ville.

	SmallPT	BigPT	BigCar
Part du véhicule électrique dans les déplacements	20%	22%	37%
Distances moyennes parcourues dans la ville (un aller au centre)	6 km	9.5 km	11.7 km

TABLE 4.2 – Part du véhicule électrique dans les déplacements (tous modes confondus) et distances moyennes pour aller au centre dans trois villes monocentriques circulaires

	SmallPT	BigPT	BigCar
CO ₂ évité par véhicule	0.60 tCO ₂ /VE	1 tCO ₂ /VE	1.2 tCO ₂ /VE

TABLE 4.3 – Quantité de CO₂ évitée par véhicule électrique en circulation dans trois villes sur une année

De nombreux rapports préconisent des objectifs en nombre de véhicules électriques pour réduire les émissions des transports. Par exemple, l'objectif de la Programmation Pluriannuelle de l'énergie de 2016 est de 2 millions de véhicules électriques à l'horizon 2030. La répartition des utilisateurs de ces véhicules sur le territoire n'est pas détaillée dans les objectifs. Or, selon le type de ville qui participe à cet objectif et donc selon la forme urbaine où seront utilisés ces véhicules, la réduction totale d'émissions associées à l'objectif de nombre de véhicules peut varier. Pour un même objectif en nombre de véhicules, les émissions évitées seront plus élevées dans une grande ville, où les transports en voiture sont dominants, que dans une grande ville avec des transports en commun. De même, elles seront plus élevées dans une grande ville que dans une petite ville (à système de transport constant).

Nous constatons également que les automobilistes des grandes villes ont, en moyenne, un plus grand avantage financier à utiliser le véhicule électrique. Pour des prix des énergies données, les automobilistes de la grande ville étalée seront plus nombreux à être financièrement intéressés par ce véhicule.

Si nous supposons que l'investissement nécessaire à la disponibilité et l'utilisation d'un véhicule électrique est identique dans toutes les villes (et donc quel que soit le volume total de véhicules utilisés), nous pouvons en déduire que la tonne de CO₂ évitée est deux fois plus chère dans SmallPT que dans BigCar et 1,7 fois plus chère dans SmallPT que dans BigPT.

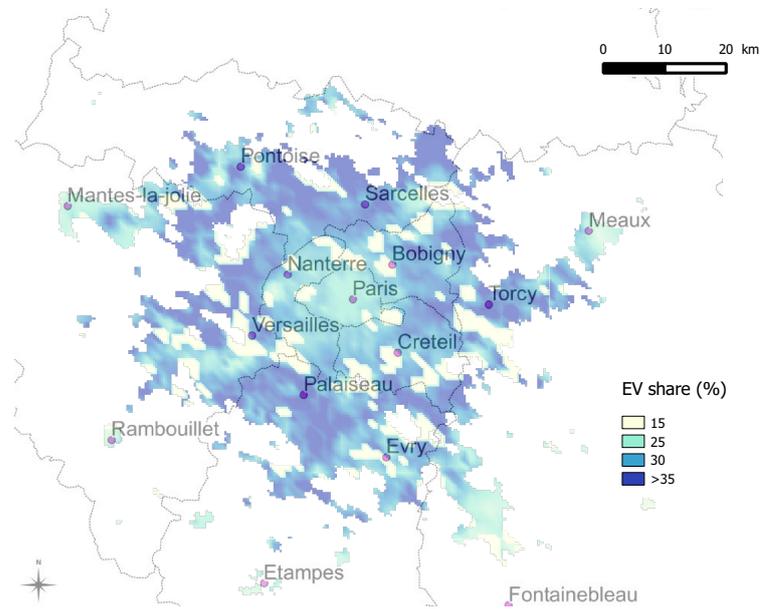
Il faudrait donc privilégier le déploiement des véhicules électriques dans les grandes villes, de préférence sans transport en commun, mais ce type de ville n'existe pas en France, où les grandes villes sont dotées de réseaux de transport en commun développés. Il conviendrait donc de privilégier le déploiement du véhicule électrique d'abord dans les grandes villes avec transport en commun puis, dans un second temps, dans les petites villes.

Nous n'avons étudié que les déplacements en ville, mais les résultats qui montrent que les véhicules électriques sont surtout pertinents dans les localités peu denses où la voiture est le mode de transport dominant peuvent aussi être extrapolés aux zones rurales. Ces zones ne sont pas desservies par les transports en commun et les distances parcourues sont plus longues qu'en centre ville. Le véhicule électrique pourraient alors permettre des réductions d'émissions comparables à celles des grandes villes étalées de type BigCar. Une analyse détaillée serait nécessaire pour confirmer cette affirmation mais celle-ci n'a pas été conduite dans cette thèse car le modèle NEDUM-2D n'étudie que les formes urbaines.

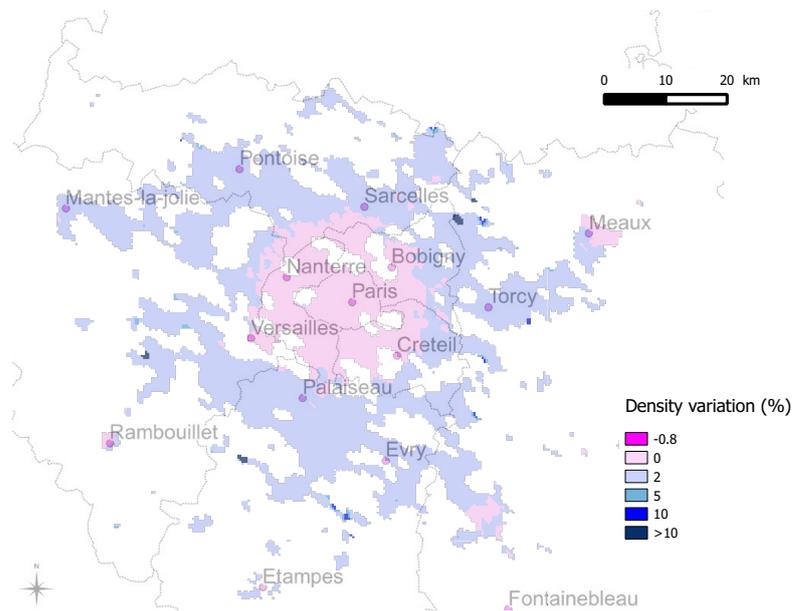
Ile de France

Les résultats obtenus jusqu'ici s'appliquent à des villes fictives et nous ont permis de faire émerger les liens théoriques entre introduction du véhicule électrique, présence de transport en commun et taille de la population. Nous allons maintenant explorer ces liens dans le cas d'une aire urbaine plus réaliste et polycentrique : l'Ile de France.

NEDUM-2D nous permet dans un premier temps de calculer et représenter les parts de marché du véhicule électrique dans chaque localité. La figure 4.3a montre une plus forte utilisation du véhicule électrique parmi les véhicules privés à mesure que l'on s'éloigne des centres d'emploi et inversement une utilisation plus faible à proximité. Ce résultat découle directement de l'hypothèse de choix du véhicule en fonction de son coût total (cf chapitre 2).



(a) Proportion des utilisateurs du véhicule électrique parmi les utilisateurs de voitures en Ile de France en 2050



(b) Variation de densité induite par la disponibilité du véhicule électrique en Ile de France en 2050

FIGURE 4.3 – Localisation potentielle des utilisateurs du véhicule électrique et impact du véhicule électrique sur la densité en Ile de France en 2050

Les variations de densité induites par le véhicule électrique sont faibles. Si nous comparons la ville monocentrique BigPT et l'Ile de France, nous voyons que le polycentrisme réduit l'influence du véhicule électrique sur la densité. Dans une ville polycentrique, le véhicule électrique n'encourage donc que faiblement l'étalement urbain. Le bandeau plus foncé (environ 10% de variation de densité) qui était présent dans BigPT n'est plus visible en Ile de France. La raison sous-jacente est simple, l'effet sur la ville polycentrique est une superposition des effets sur plusieurs petites villes monocentriques de type SmallPT.

Cependant, les émissions évitées en Ile de France sont de 35% et le potentiel d'émissions évitées par véhicule électrique utilisé est de 1,4tCO₂/VE. On s'attendrait, à ce que l'effet de l'introduction du véhicule électrique sur les émissions soit lui aussi une superposition des effets de plusieurs petites villes de type SmallPT. La réduction d'émissions totale et par véhicule utilisé est aussi plus élevée que celle de la ville BigPT. Cela est dû au fait qu'en Ile de France, les transports en commun ne sont pas accessibles en tous les points. Certains endroits ne sont pas desservis, les ménages sont alors prisonniers de la voiture et la totalité des ménages de ces localités se déplace donc en voiture. Le plus souvent ces endroits sont éloignés des centres et les ménages parcourent de grandes distances, l'arrivée du véhicule électrique leur permet de réduire leur coût de déplacements. Ce n'est pas le cas dans les trois villes circulaires, où les transports en commun sont accessibles en tous points. Dans toutes les localités, une partie des ménages se déplace en transport en commun, la part du véhicule électrique est alors plus faible.

Résumé

Ces résultats montrent que, dans les villes étalées et monocentriques (où les ménages parcourent de plus grandes distances pour rejoindre le centre), la disponibilité du véhicule a deux conséquences notables, elle encourage l'étalement urbain et elle permet de réduire les émissions de CO₂. Cela est dû au fait que le véhicule électrique est intéressant pour les ménages qui parcourent le plus de kilomètres. Ces ménages se situent en bordure de la ville et l'introduction du véhicule électrique réduit les coûts d'utilisation du véhicule privé et leur permet d'aller habiter encore un peu plus loin.

Mais ces conséquences ne sont pas uniformes selon le type de ville.

Dans les plus petites villes, les localités en bordure ne sont pas suffisamment éloignées pour rendre le véhicule électrique intéressant financièrement.

Dans les grandes villes denses, nous retrouvons l'effet de la taille de la population, qui augmente la taille de la ville et donc la distance au centre. Le véhicule électrique devient intéressant financièrement. Cependant, la présence des transports en commun entraîne la densification de la ville et atténue l'impact de l'introduction du véhicule électrique.

Dans les grandes villes où les transports en commun ne sont pas présents, la ville est plus étalée et les résultats de l'introduction du véhicule électrique sont plus visibles. En effet, le véhicule électrique est utilisé plus souvent et pour de plus grandes distances. C'est dans ce type de ville que l'efficacité en terme d'émissions évitées par véhicule en circulation est la plus élevée.

Enfin, dans une ville plus réaliste comme l'Ile de France, le polycentrisme réduit l'amplitude de l'étalement urbain induit par le véhicule électrique et l'inaccessibilité des transports en commun en certains points augmente le taux d'émissions évitées.

4.4 Discussion : effet de la taille de la population et de la présence de transports en commun, répartition des efforts de développement sur les territoires

Nous distinguons donc l'effet de deux attributs de la forme de la ville sur le potentiel d'émissions évitées associé au véhicule électrique : l'effet de la taille de la population et l'effet de la présence de transport en commun. Pour chacun de ces effets, nous avons développé des analyses complémentaires. Ces analyses nous permettent de compléter les résultats et nous amènent à considérer les implications en terme de répartition des efforts à mettre en oeuvre pour déployer le véhicule électrique au sein de la ville et sur l'ensemble du pays.

Véhicule électrique et taille de la population

Nous menons une analyse de sensibilité qui porte sur la taille de la population dans une ville où les transports en commun sont disponibles. Nous calculons les émissions évitées par la disponibilité du véhicule électrique dans plusieurs villes monocentriques circulaires de taille (population) différentes. C'est ce que montre la figure 4.4 pour des villes allant de 10 000 à 10 millions d'habitants ¹.

1. Nous ne testons pas de villes plus grandes car l'hypothèse de monocentrisme deviendrait non pertinente.

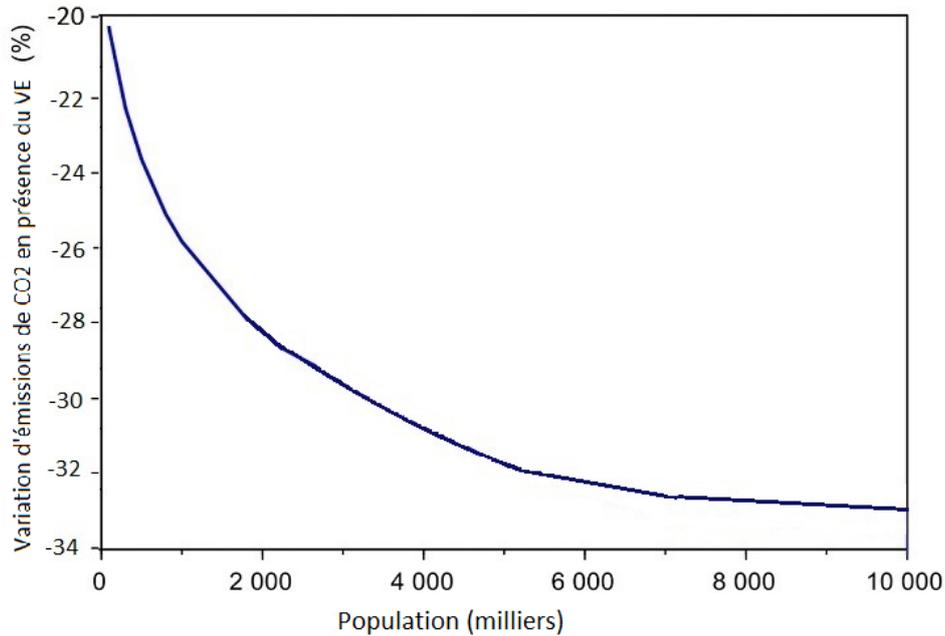


FIGURE 4.4 – Variations des émissions liées à la disponibilité du véhicule électrique pour différents niveaux de population

Nous remarquons qu'en accord avec les résultats de ce chapitre, le véhicule électrique évite proportionnellement plus d'émissions dans les grandes villes. Cependant, le taux d'émissions évitées croît à taux décroissant avec la taille de la population. Ainsi, entre une ville de 10 000 habitants et une ville de 5 millions d'habitants l'écart entre les pourcentages d'émissions évitées par le véhicule électrique est plus grand que celui entre une ville de 5 millions d'habitants et une ville de 10 millions d'habitants.

Il y a donc un tassement de l'effet de la taille de la population sur la proportion d'émissions évitées. Ceci montre l'existence d'une limite dans la proportion d'émissions que le véhicule électrique peut éviter. Dans le cas de cette étude de sensibilité, elle se situe aux alentours de 35%.

L'existence de cette limite s'explique ainsi : l'agrandissement de la ville monocentrique n'est pas infini. Le coût du temps, qui dépend de la distance de manière plus que proportionnelle, retient l'étalement urbain. La ville très peuplée s'agrandit moins vite et la part du véhicule électrique stagne.

La valeur de cette limite découle du choix du paramètre de logit sur les technologies (voir chapitre 2). Nous rappelons que ce paramètre synthétise l'importance

du coût dans le choix du véhicule électrique. Pour des valeurs faibles, le coût a une influence limitée sur le choix et la répartition des ménages sur les trois technologies est lissée. Seul un écart de prix très conséquent pourra déséquilibrer les choix. Dans l'analyse que nous avons menée, le logit a une valeur calibrée sur les choix actuels en France. Celle-ci est plutôt faible (1,5). Alors, les choix sont plutôt équilibrés et les véhicules électriques plafonnent à 33% des parts de marché dans les plus grandes villes, limitant ainsi mécaniquement le taux d'émissions évitées. Autrement dit, avec le logit utilisé, les différences de coût entre les technologies ne justifient pas la suprématie de l'une d'entre elle sur les autres.

Nous pourrions imaginer que ce paramètre augmente dans le futur, accordant une plus grande place au coût dans le choix des véhicules. Cela favoriserait l'utilisation du véhicule électrique et entraînerait des résultats plus contrastés.

Par ailleurs, nous notons que même dans la plus petite ville (10 000 habitants) les émissions évitées s'élèvent à 20%. Cette ville n'est cependant pas très représentative des villes réelles de 10 000 habitants car nous avons supposé un réseau de transport en commun aussi dense et rapide que celui de la plus grande ville. De plus, l'hypothèse de localisation de l'intégralité des emplois dans le centre est peu pertinente. Pour ce type de petite ville, une partie des habitants travaille dans les grandes villes voisines. Ce dernier point entraînerait une plus grande utilisation des véhicules électriques et donc des émissions évitées plus importantes.

Véhicule électrique et transports en commun

Newman and Kenworthy (2006) ont montré qu'il existe un seuil, autour de 35 habitants et emplois par hectare, à partir duquel la ville est trop étalée pour pouvoir mettre en place un réseau de transport en commun et envisager sa densification. Il est intéressant de voir si, à partir de ce seuil, le véhicule électrique représente une solution pour réduire les émissions, quitte à encourager encore l'étalement de la ville. En comparant ce résultat aux densités des trois villes circulaires décrit dans le tableau 4.4, nous remarquons que seule la plus petite ville est en dessous du seuil de viabilité des transports en commun. Cependant, le seuil calculé par Newman and Kenworthy (2006) s'appuie sur les 58 villes les plus riches en 1995. Ce seuil ne concerne donc que de très grandes villes et n'est pas pertinent pour évaluer la ville SmallPT.

La ville BigCar est au dessus du seuil de viabilité des transports en commun, elle pourrait choisir de développer un réseau et de limiter l'étalement, pour tendre vers la ville BigPT. BigCar diminuerait alors ses émissions de 45%, soit plus qu'avec l'introduction du véhicule électrique. Mais cet effort supposerait de développer un réseau efficace, étendu à toute la ville, et de déconstruire l'habitat en bordure. Il faudrait comparer le coût de cette déconstruction au coût de déploie-

ment des infrastructures nécessaires aux véhicules électriques, mais il est difficile d'évaluer le coût d'une telle politique

A titre de comparaison, la construction de la ligne 14 du métro parisien, ouverte en 1998, a coûté approximativement 1,3 milliard d'euros aux pouvoirs publics, pour 9km de long et environ 500 000 voyageurs transportés par jour (comprend les aller-retour au travail et les trajets de loisirs).

La ville BigCar nécessiterait l'installation à minima de 3,7 millions de bornes (une borne par véhicule), dont une partie serait financée par les pouvoirs publics. En reprenant les préconisations de Nègre and Legrand (2011) sur la proportion de bornes publiques et leur puissance, nous obtenons un investissement de 5 milliards d'euros pour les pouvoirs publics. Cela correspond donc pour les à un investissement équivalent à 4 lignes de métro. Ce qui ne permet pas de développer un réseau de transport en commun dense.

Cependant, cette comparaison n'est que partielle. En effet, l'installation de bornes ne garantit pas l'utilisation à large échelle du véhicule électrique. De plus, nous n'avons pas tenu compte dans le calcul des coûts opérationnels du réseau de transport en commun ou des bornes.

	SmallPT	BigPT	BigCar
Densité	22.1 hab/ha	65.8 hab/ha	47.1 hab/ha

TABLE 4.4 – Densité moyenne dans trois villes circulaires monocentriques

Véhicule électrique en Ile de France et bornes de recharge

En Ile de France, le modèle NEDUM-2D nous a permis de simuler la répartition potentielle des véhicules électriques. Cette simulation nous informe donc aussi sur la répartition des installations préalables nécessaires à l'utilisation du véhicule électrique : les bornes de recharge. Pour dimensionner le nombre de prises de recharge, le Plan National de 2009 pour le déploiement des véhicules électriques fait l'hypothèse de 2,2 prises de recharge par véhicule en circulation. Le rapport prévoit aussi que 90% des prises de recharge seront installées dans les copropriétés, habitations et immeubles de bureaux. Pour ce faire, des directives sur l'installation de bornes dans les bâtiments ont été mises en place (cf chapitre 1).

Une partie des bornes sera donc installée dans les différents centres d'emplois et une autre dans les lieux de résidence des utilisateurs.

Pour apporter des éléments de réflexions sur la répartition de ces bornes, nous représentons dans un premier temps le nombre de véhicules électriques rejoignant chaque centre d'emploi sur une carte. Dans un second temps nous représentons le nombre de véhicule électrique rejoignant chaque localité de résidence.

La carte 4.5 montre le nombre de véhicules électriques convergeant vers chaque centre d'emploi et ainsi le nombre de prises associées.

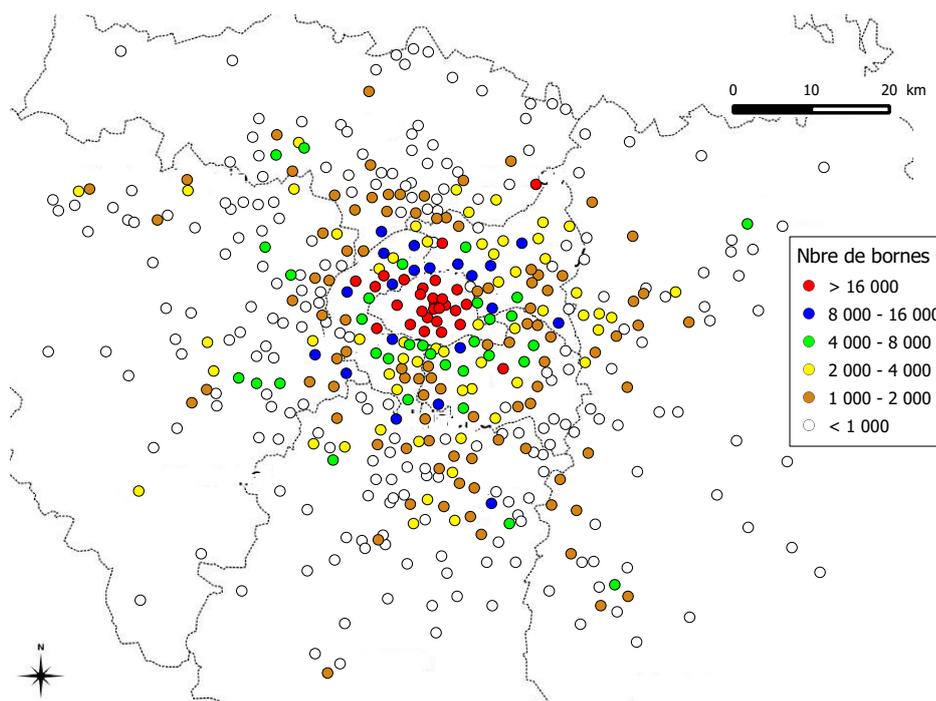


FIGURE 4.5 – Répartition des bornes de recharge répondant à l'utilisation du véhicule électrique dans chaque centre d'emploi

Les résultats nous ayant permis de tracer cette carte, indiquent que 70% des prises de recharge devraient se situer dans Paris et petite couronne. Dans Paris, 560 000 prises devraient être installées (en comptant une prise par véhicule se rendant sur place). En petite couronne, le nombre de bornes est reparti plus uniformément sur le territoire mais représente lui aussi 560 000 prises.

La carte 4.6 montre le nombre de véhicules électriques dans chaque localité de résidence des utilisateurs. Nous remarquons que sur cette carte, la majorité des bornes devraient se situer dans Paris et en proche banlieue. Cependant la répartition entre Paris et petite couronne n'est pas identique. Ainsi, 175 000 utilisateurs de véhicule électrique résident dans Paris contre 590 000 en petite couronne. Dans

Paris comme en petite couronne, la concentration d'utilisateurs de véhicules électriques est plus élevée dans l'Ouest.

En combinant ces deux cartes, nous pouvons calculer le nombre de bornes nécessaires en supposant que chaque véhicule électrique dispose de deux bornes, une sur le lieu de résidence et une sur le lieu de travail. Le nombre de bornes implantées en petite couronne s'élèverait alors à 1,15 million. Dans Paris, ce nombre serait de 735 000 bornes.

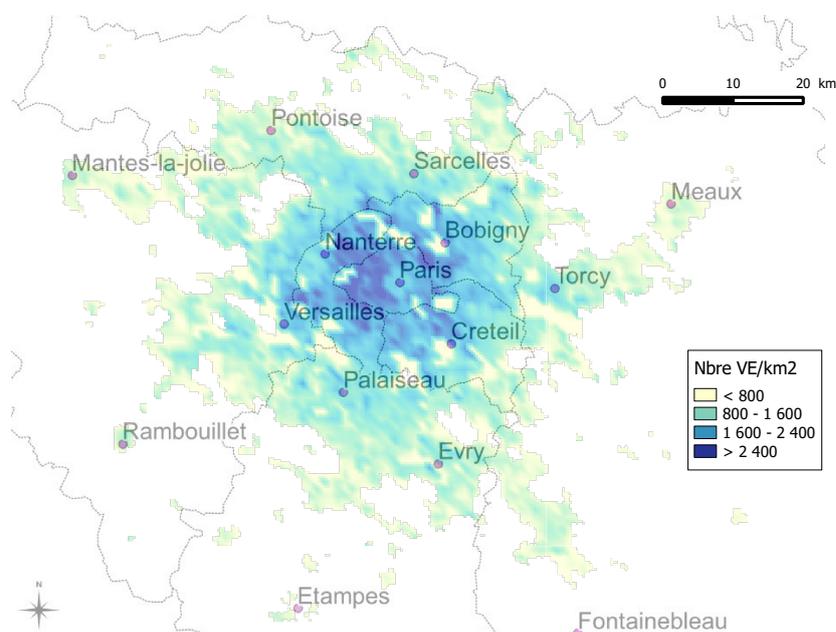
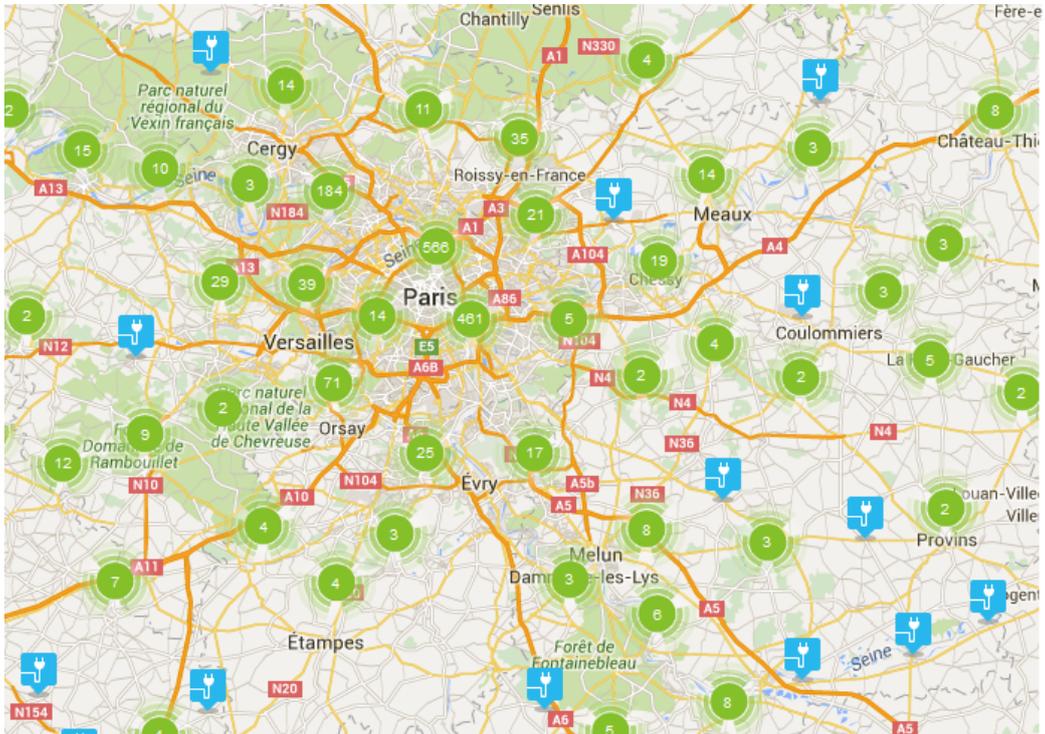
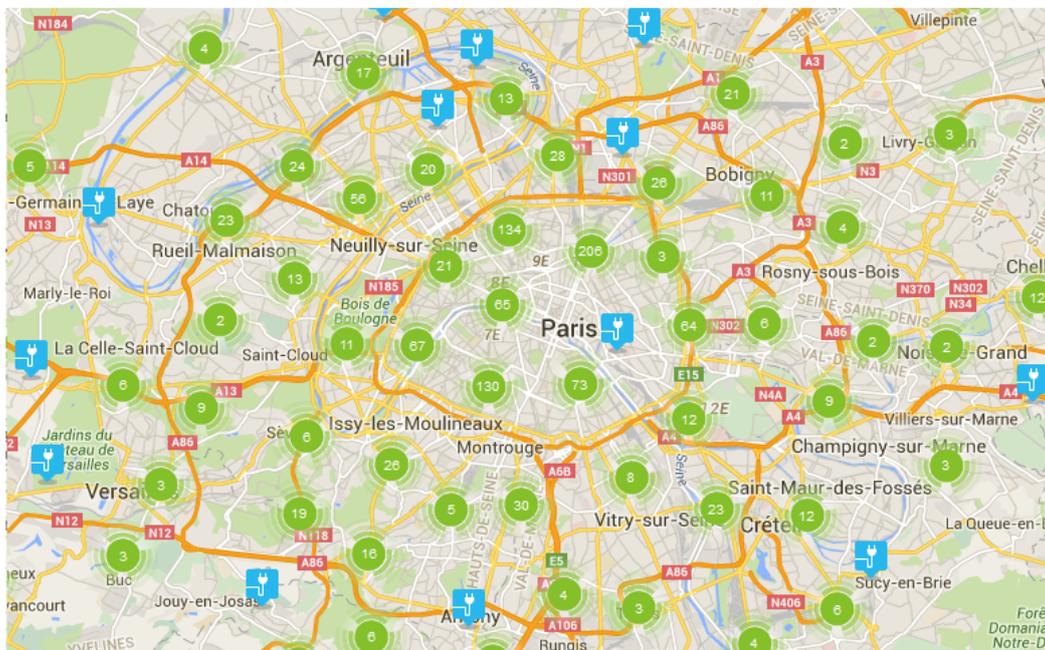


FIGURE 4.6 – Nombre de véhicules électriques par lieu d'habitation

Les cartes 4.7a et 4.7b donnent la répartition des 1530 bornes actuellement installées en Ile de France. En moyenne, en Ile de France, chaque borne est équipée de 7 prises. La représentation étant différente, il est difficile de comparer ces cartes avec les précédentes. Nous pouvons néanmoins noter que la répartition actuelle des bornes est largement concentrée dans Paris. Or, nous avons pu calculer que les besoins en petite couronne seraient supérieurs.



(a) Bornes de recharge installées en Ile de France (source :ChargeMap)



(b) Bornes de recharge installées sur Paris et petite couronne (source :ChargeMap)

FIGURE 4.7 – Localisation des bornes de recharge en Ile de France. En moyenne, chaque borne est équipée de 7 prises.

Nous devons cependant souligner quelques limites à garder en mémoire lors de la consultation de ces cartes. Le modèle ne prend pas en compte la distribution des revenus sur le territoire (Carte 4.8). Le véhicule électrique étant cher à l'achat, même si celui-ci peut être acheté à crédit, il est peu probable que ce véhicule soit acheté par les ménages les plus modestes. Or, en observant une carte de répartition des revenus en Ile de France, nous remarquons que certaines zones où le modèle prévoit que le véhicule électrique est très présent, sont des territoires où les ménages ont un revenu faible. C'est notamment le cas des communes au nord de Paris. Les cartes suggérant l'installation de bornes dans ces localités, surévaluent donc probablement le nombre de bornes.

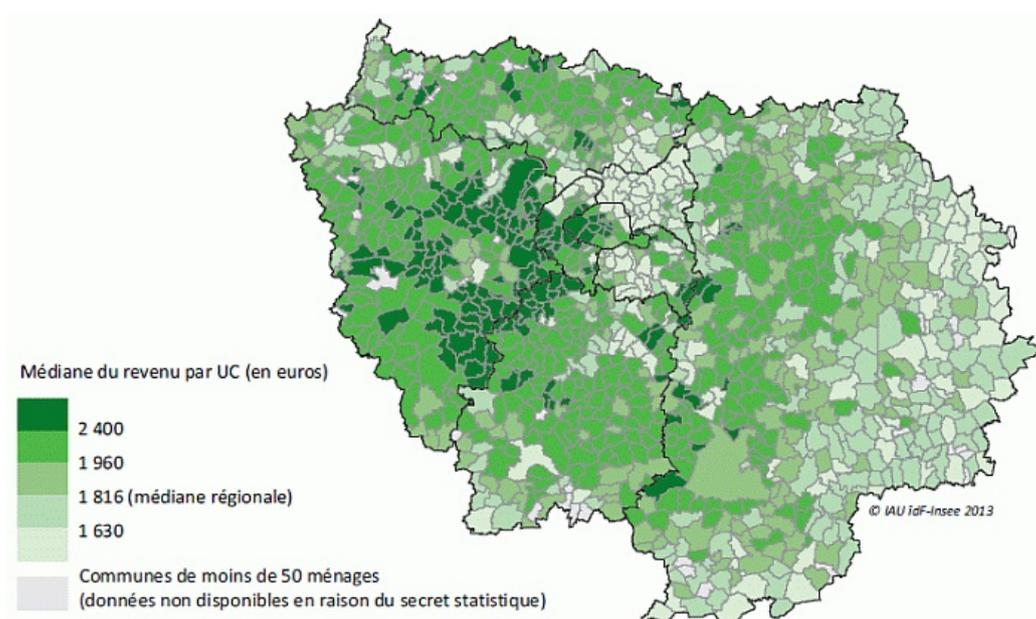


FIGURE 4.8 – Revenus médians en Ile de France en 2010 (source : INSEE, 2013)

Coût-efficacité du véhicule électrique et égalité des territoires

Les résultats nous permettent de distinguer les différences de potentiel en terme d'émissions évitées par véhicule électrique utilisé. Cependant les politiques mises en oeuvre pour développer ce véhicule sont en partie mises en place à l'échelle nationale. La Stratégie Nationale Bas Carbone 2015 qui inclut un volet sur la mobilité, réaffirme par exemple la volonté de soutenir le véhicule électrique par des politiques nationales et des aides aux collectivités. Le super bonus écologique, accordé actuellement à l'achat d'un véhicule électrique, s'élève à 6300€.

Nous pouvons supposer que l'existence d'un véhicule électrique à 15 000€ tel que décrit dans la section 4.2, est en partie due au maintien de ce super bonus.

Si l'on rapporte cette subvention à la quantité de dioxyde de carbone évitée, on obtient un coût de la subvention de la tonne de CO₂ évitée (tableau 4.5). Nous remarquons en premier lieu que ces valeurs sont plus élevées que les propositions de taxes carbone qui ont été faites jusqu'ici.

	SmallPT	BigPT	BigCar
Coût de la subvention/tCO ₂ évitée	700 € /tCO ₂	420 € /tCO ₂	350 € /tCO ₂

TABLE 4.5 – Coût de la subvention par tonne de CO₂ évitée par les véhicules électriques en circulation dans trois villes

Le véhicule électrique est plus coût-efficace dans les grandes villes que dans les plus petites puisqu'il permet d'éviter les émissions à un moindre coût.

Pour optimiser la répartition des efforts des politiques afin de réduire les émissions à l'aide du véhicule électrique, il serait pertinent d'augmenter les subventions dans les villes où le véhicule électrique permet de réduire le plus les émissions, c'est à dire dans les grandes villes étalées, voir même dans les zones où celui-ci est le plus utilisé dans la ville, autrement dit les localités éloignées du centre d'activité. Ceci permettrait d'augmenter la part de marché du véhicule électrique dans ces localités où les distances parcourues sont les plus importantes.

Néanmoins, distinguer des subventions nationales selon le lieu de résidence pourrait s'opposer au principe d'égalité devant l'impôt, qui veut que tous les citoyens appartenant à une même catégorie reçoivent le même traitement fiscal.

Cependant, le Conseil constitutionnel affirme que : "le principe d'égalité ne s'oppose ni à ce que le législateur règle de façon différente des situations différentes, ni à ce qu'il déroge à l'égalité pour des raisons d'intérêt général, pourvu que, dans un autre cas, la différence de traitement qui en résulte soit en rapport avec l'objet de la loi qui l'établit". Cette différenciation doit être fondée sur "un critère objectif, raisonnable, pertinent au regard du but poursuivi" (Conseil constitutionnel, 2001). Or la Charte de l'environnement ayant été intégrée à la Constitution, l'intérêt général pourrait être établi.

Mais la jurisprudence n'ayant statué sur la discrimination positive que dans les cas où cette discrimination vise à combler le handicap (économique, de santé, d'éducation...) d'une partie des citoyens, il est difficile de conclure quand à la

constitutionnalité de l'attribution d'une subvention sur un critère de performance écologique.

4.5 Conclusion

Le message principal en terme d'implication politique sur la réduction des émissions des transports privés en ville porte sur l'adéquation des politiques déployées à la forme urbaine en question.

Ainsi, la disponibilité du véhicule électrique à large échelle dans une ville n'aura pas les mêmes effets sur les émissions selon le type de ville. Autrement dit, avec le même nombre de véhicules électriques, les réductions d'émissions ne seront pas identiques pour des villes de formes différentes.

Si on admet que le choix d'une technologie de véhicule privé (à disponibilité équivalente) est principalement conditionné par le coût de possession, c'est dans les villes étalées, où les distances parcourues sont suffisamment grandes, que le véhicule électrique sera le plus efficace pour réduire les émissions. Cependant, ce potentiel de réduction plus élevé s'accompagnera d'une augmentation de l'étalement urbain. En effet, le fait que le véhicule électrique soit plus efficace dans les grandes villes étalées pour réduire les émissions est en partie conditionné à la possibilité pour ces villes de s'étendre encore.

De nombreuses analyses associent l'étalement urbain à une augmentation des émissions liées aux transports. Mais nous montrons que l'introduction du véhicule électrique permettrait d'atténuer l'impact de l'étalement urbain sur les émissions associées aux transports. Ainsi, le véhicule électrique offre une solution pour réduire les émissions des transports aux villes étalées et à celle en expansion.

Nous retrouvons dans les résultats de l'article, l'idée que la forme urbaine et les technologies de déplacement utilisées évoluent conjointement et non de façon indépendante. En effet, dans une ville déjà étalée qui ne dispose pas de réseau de transports en commun efficace, la densification de la ville, qui permettrait de faire diminuer les distances parcourues en véhicule privé, doit s'accompagner d'un déploiement du réseau de transports en commun, afin que les trajets sur ce réseau puissent se substituer aux trajets en voiture. Or, le déploiement d'un tel réseau sur des grandes villes n'est viable que si la ville est suffisamment dense et suffisamment peu étalée (Murray and Wu, 2003). La comparaison du coût de la densification (déconstruction et transport en commun) et du coût de déploiement d'un véhicule électrique disponible à large échelle pourrait faire l'objet de recherches futures.

Cependant, il faut rappeler que l'étalement urbain est associé à de nombreux autres effets négatifs. On peut notamment citer l'augmentation des problèmes de

santé (réduction de l'activité physique, obésité, hypertension) (Ewing et al., 2008), l'artificialisation des sols qui impacte la biodiversité, ou encore l'augmentation du coût des services publics (Carruthers and Ulfarsson, 2003). L'ensemble de ces effets liés à l'étalement urbain, associés à l'accroissement constant de la population urbaine dans le monde, ont conduit les politiques à considérer des actions pour limiter cet étalement. Le chapitre suivant s'intéresse aux interactions qui pourraient résulter de l'association de politique de lutte contre l'étalement et du déploiement du véhicule électrique.

Chapitre 5

Interactions entre introduction du véhicule électrique et politiques de restriction à l'étalement urbain

Nous avons montré dans le chapitre précédent que le véhicule électrique serait surtout pertinent dans les grandes villes où les ménages roulent sur de plus grandes distances. Cette solution technologique permet de réduire les émissions, mais cela ne suffira pas à atteindre les objectifs que se sont fixés les pays en matière de réduction d'émissions. Dans le chapitre précédent, le véhicule électrique permet d'éviter des émissions mais ne les réduit pas à zéro.

De plus, nous avons vu dans le chapitre précédent que la réduction des émissions apportée par le véhicule électrique était en partie liée à l'étalement urbain. Celui-ci rend, en effet, les localités éloignées plus accessibles et encourage les ménages à s'installer plus loin, mais il permet aussi de rendre ces déplacements lointains moins émetteurs.

Or l'étalement urbain est actuellement une cause majeure de l'augmentation du volume d'émissions de gaz à effet de serre, notamment dans le secteur des transports. Les villes compactes sont alors considérées comme une solution pour limiter les émissions (Bento et al., 2003). Glaeser and Kahn (2010) ont montré que les villes qui mettent en place des restrictions à l'étalement émettent moins que les autres. Les politiques de planification urbaine font donc aussi partie des solutions évoquées pour réduire le niveau d'émissions de CO₂ (Weisz and Steinberger, 2010).

D'un côté, le potentiel de réduction d'émissions associé au véhicule électrique est plus élevé dans les grandes villes étalées. D'un autre côté, la restriction à l'étalement urbain permet aussi de limiter les émissions.

Nous faisons donc l'hypothèse que la mise en oeuvre de deux politiques poursuivant le même objectif (réduire les émissions), mais s'appuyant sur des leviers

différents, pourraient dans certain cas, se contre carrer. Autrement dit, la mise en oeuvre d'une restriction à l'étalement urbain pourrait limiter le potentiel de réduction offert par le véhicule électrique.

Afin de tester cette hypothèse, nous comparons l'effet de leur mise en place simultanée et séparée. Nous commençons par étudier trois villes monocentriques circulaires puis répétons l'exercice sur l'Ile de France.

5.1 Méthode : mise en oeuvre simultanée d'une politique de subvention au véhicule électrique et d'une restriction à l'étalement urbain

Nous étudions donc les interactions entre des politiques favorisant le déploiement du véhicule électrique et des politiques de restriction à l'étalement urbain.

Comme les interactions entre forme de ville et déploiement du véhicule électrique dépendent du type de ville, nous reprenons ici la même approche, en analysant les interactions des politiques pour plusieurs types de villes différents.

Nous utilisons le même modèle circulaire et monocentrique sur les trois villes décrites dans le chapitre précédent : SmallPT, BigPT, BigCars. Nous utilisons aussi les mêmes données et paramètres, excepté le paramètre de logit.

En effet dans cette analyse, les interactions étant potentiellement compliquées à expliquer, nous décidons d'avoir des choix de véhicule contrastés et reflétant mieux les différences de coûts d'usage et d'achat (ATCO). Ceci nous permet d'avoir des effets de politiques plus visibles et donc plus faciles à interpréter. Pour cela nous choisissons, à la différence du chapitre précédent, un paramètre de logit affecté au choix des technologies qui soit élevé, ceci rend le choix du type de véhicule plus homogène pour un même type de ménage et donc une réponse aux différences de coûts plus contrastée (voir chapitre 2). Afin de mesurer l'influence de ce choix nous réaliserons aussi une analyse de sensibilité sur ce paramètre de logit.

Puis, nous réalisons la même analyse avec le modèle NEDUM-2D sur l'Ile de France, afin de confronter les premiers résultats obtenus avec une situation plus réaliste, en présence de polycentrisme.

Politiques modélisées

Pour parvenir à rendre la ville plus dense et à endiguer l'étalement urbain, des politiques de restriction ont été mises en place (Jabareen, 2006). Parmi ces politiques, on trouve des politiques spatiales : les ceintures vertes et les restrictions à la croissance urbaine.

La ceinture verte définit une zone (souvent autour de la zone urbanisée existante) dans laquelle il est interdit de construire.

La restriction à la croissance urbaine est une limite au delà de laquelle l'urbanisation est interdite ou limitée (par des actions réglementaires ou des incitations financières).

Les deux politiques étant assez proches, nous ne ferons pas la distinction dans la suite de l'analyse. La politique de restriction de l'étalement urbain est approximée par une ceinture verte, autour des limites actuelles de la ville (2015), qui interdit l'installation des ménages en dehors de cette ceinture. La croissance de la population se traduit alors par une densification en tous points de la ville.

La politique de déploiement du véhicule électrique est approximée par une subvention au véhicule électrique, donc par une baisse de son prix. Cette subvention peut être interprétée de plusieurs manières : comme une subvention directe au coût d'achat ou comme une aide indirecte au déploiement de la filière, qui se traduirait par une baisse du coût d'achat. Nous faisons donc varier le prix du véhicule électrique afin d'illustrer plusieurs scénarios sur l'effort entrepris pour le déploiement de cette technologie. Celui-ci s'étale de 25 000€ dans le cas où le véhicule électrique n'est pas encouragé, à 9 000€ dans le cas où des efforts ont été faits pour rendre ce véhicule accessible (prix équivalent à celui du véhicule essence, qui est le moins cher).

Scénario

Le résultat des politiques mises en place est observé en 2050, car leurs effets ne peuvent être immédiats (temps de déploiement du véhicule, temps d'évolution de la forme urbaine).

Le scénario utilisé pour les variables de population, revenu et prix est explicité dans le tableau 5.1.

Les scénarios de prix du carburant et de l'électricité correspondent au scénario tendanciel de l'EIA (EIA, 2013). Les scénarios d'évolution de population urbaine et de revenu correspondent au scénario de l'UNDP (2014).

2050 (variation annuelle par rapp. à 2013)	
Prix carburant	+1.5%
Prix de l'électricité	+1%
Consommation des véhicules	constante
Prix du VE (€)	25 000 à 9 000
Prix des transports publics	+1%
Revenu moyen	+1.9%
Population	+0.7%

TABLE 5.1 – Scénario pour 2050

5.2 Résultats : le soutien au véhicule électrique peut réduire plus d'émissions seul qu'en présence d'une politique de restriction à l'étalement urbain

Analyse schématique

Pour bien comprendre l'interaction des deux politiques, il faut expliciter trois situations schématiques dans lesquelles la ville circulaire peut se trouver.

Sur la figure 5.1, la ligne pointillée verte définit la ceinture verte, au delà de laquelle la ville ne peut s'étaler. Le disque hachuré définit la zone où le véhicule électrique n'est pas intéressant financièrement pour les ménages. La taille de cette zone varie avec le prix du véhicule. Enfin, la zone bleue définit la zone dans laquelle le véhicule électrique est intéressant, le dégradé schématise les parts de marché de cette technologie, de plus en plus élevées à mesure qu'on s'éloigne du centre.

Rappelons que la présence d'une ceinture verte a pour effet de limiter l'étalement urbain et d'augmenter la densité en tous points, donc de réduire les distances parcourues en moyenne.

Dans le cas 1, le véhicule électrique est cher et aucun (ou peu de) ménage ne l'utilise à l'intérieur de la ceinture verte. La présence d'une ceinture réduit les distances parcourues avec les véhicules thermiques, donc les émissions. Sans ceinture, la ville serait plus étalée, mais les ménages n'utiliseraient toujours que très peu le véhicule électrique.

Dans le cas 3, le véhicule électrique est bon marché, beaucoup de ménages l'utilisent et la présence de la ceinture verte a pour effet de réduire les distances parcourues avec tous les véhicules, donc les émissions totales.

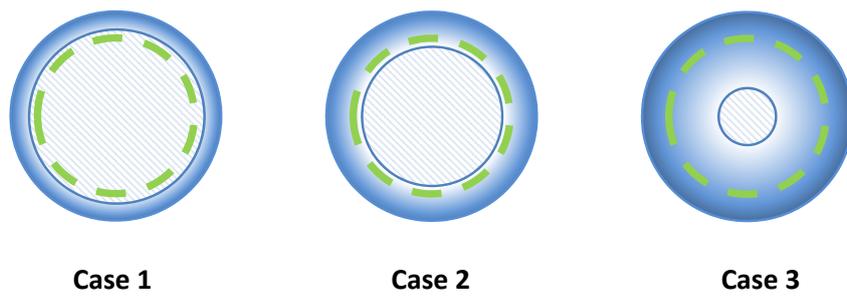


FIGURE 5.1 – Positions relatives de la ceinture verte et des zones d'utilisation du véhicule électrique

Le cas 2 est moins simple, d'un côté la présence de la ceinture réduit les distances parcourues en moyenne sur la ville, d'un autre côté, comme elle empêche la ville de s'étendre, elle l'empêche aussi d'atteindre un rayon suffisamment grand pour que le véhicule électrique commence à être utilisé. Les effets sur les émissions des deux politiques mis en oeuvre simultanément peuvent alors se neutraliser.

L'intuition est qu'il doit exister un intervalle de prix du véhicule électrique pour lequel la ceinture verte et le déploiement du véhicule électrique actionnent des mécanismes de réduction des émissions opposés. La mise en place d'une ceinture verte réduirait alors le potentiel de réduction du véhicule électrique.

Trois villes circulaires

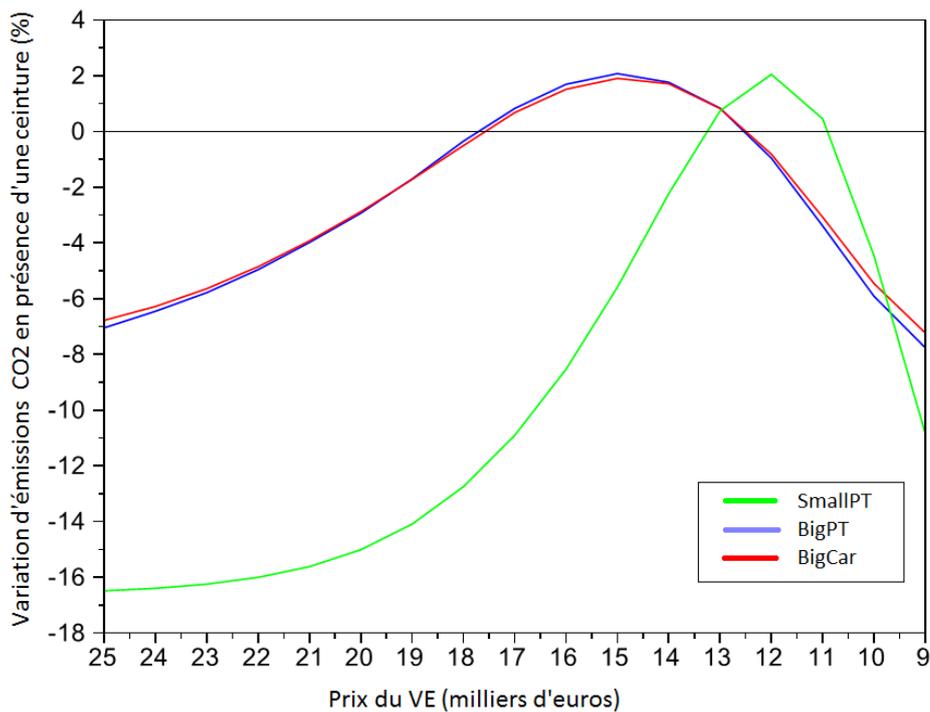


FIGURE 5.2 – Impact de la ceinture verte sur les émissions de CO₂ en fonction du prix du véhicule électrique

La figure 5.2 nous montre que l'impact de la ceinture sur les émissions est de même magnitude pour BigPT (en rouge) et BigCars (en bleu) pour tous les prix

du véhicule électrique. Les résultats sont donc les mêmes dans le cas d'une ville étalée sans transport en commun et une ville de même population plus compacte. La courbe pour SmallPT a la même forme (en vert) mais avec une amplitude différente. La ceinture est deux fois plus efficace pour réduire les émissions dans une petite ville que dans une grande ville lorsque le véhicule électrique est très cher ou très bon marché. Elle devient par contre aussi inefficace que pour les deux autres villes pour des prix intermédiaires, mais sur un intervalle de prix différent de celui des deux autres villes.

La raison pour laquelle la ceinture est plus efficace dans SmallPT tient au fait que la même augmentation de population (en relatif) affecte plus le profil de densité d'une petite ville que celui d'une grande. Alors, comme la ceinture verte correspond à l'ancienne empreinte de la ville, elle concerne une plus grande partie des ménages en bordure de la petite ville.

De plus, la zone dans laquelle les ménages se déplacent à pied ou en transport en commun représente une plus grande proportion des ménages dans cette ville que dans les autres villes. La mise en place de la ceinture augmentant la densité en tous points de la ville, la part des ménages utilisant transports en commun et la marche à pied augmente plus que dans les autres villes.

Concernant la forme de ces trois courbes, nous remarquons deux mouvements.

Dans un premier temps, au fur et à mesure que le véhicule électrique devient plus abordable, le potentiel de réduction des émissions associé à la ceinture diminue. A partir d'un certain point la ceinture augmente les émissions.

Cela tient au fait que plus le véhicule électrique est bon marché, plus la ville veut s'étaler, car celui-ci rend les localités éloignées plus accessibles financièrement. Le véhicule électrique encourage l'étalement mais rend les trajets moins émetteurs en CO₂.

Cependant, la ceinture empêche l'étalement et donc l'utilisation du véhicule électrique jusqu'à un point où celui-ci devient plus efficace tout seul qu'en présence d'une ceinture, comme le montre le graphique 5.2. Ce mouvement correspond à la transition du cas 1 au cas 2 du graphique 5.1. C'est à dire que le véhicule électrique devient financièrement intéressant pour les ménages qui souhaiteraient s'installer juste au delà de la ceinture verte pour bénéficier d'un loyer plus faible. En s'installant plus loin et en utilisant un véhicule électrique, ces ménages permettraient une baisse des émissions, au lieu de quoi, ils restent à l'intérieur de la ceinture et utilisent un véhicule thermique.

Puis dans un second temps, alors que le prix du véhicule continue de décroître, la ceinture verte permet à nouveau de réduire les émissions. En effet, le véhicule électrique devient alors très utilisé à travers la ville, même à l'intérieur des limites de la ceinture. Dans la mesure où la présence d'une ceinture verte réduit les distances parcourues, elle permet de réduire les émissions de tous les véhicules,

même le véhicule électrique (qui émet une petite quantité de CO₂ lors de la génération de l'électricité). Ce mouvement correspond à la transition du cas 2 au cas 3 sur le graphique 5.1.

Il y a donc un intervalle de prix pour chaque ville dans lequel la subvention du véhicule électrique et une politique de ceinture verte se contrecarrent. Entre 13 000 et 10 000€ pour SmallPT et 17 000 et 12 000€ pour BigPT et BigCars, la politique en faveur du véhicule électrique et celle pour limiter l'étalement urbain engendrent plus d'émissions que la subvention au véhicule électrique seule.

Ces intervalles sont différents car les rayons des villes sont différents. Le graphique 5.3 nous montre que pour un même prix, les parts de marché du véhicule électrique sont plus élevées dans les deux grandes villes. Dans une petite ville, il faut alors un prix plus faible pour obtenir la même proportion de véhicule électrique que dans une grande ville. La distance à laquelle le véhicule électrique devient financièrement intéressant est plus petite pour des prix du véhicule électrique plus faible (le coût d'achat est alors plus rapidement amorti). Un prix plus faible permet donc au véhicule électrique d'être utilisé dans une ville dont le rayon est plus petit. L'intervalle de prix dans lequel le véhicule électrique et la ceinture verte se contrecarrent est alors plus faible dans une petite ville puisque pour un prix plus élevé celui-ci n'est pas utilisé dans la ville (cas 1 de la figure 5.1).

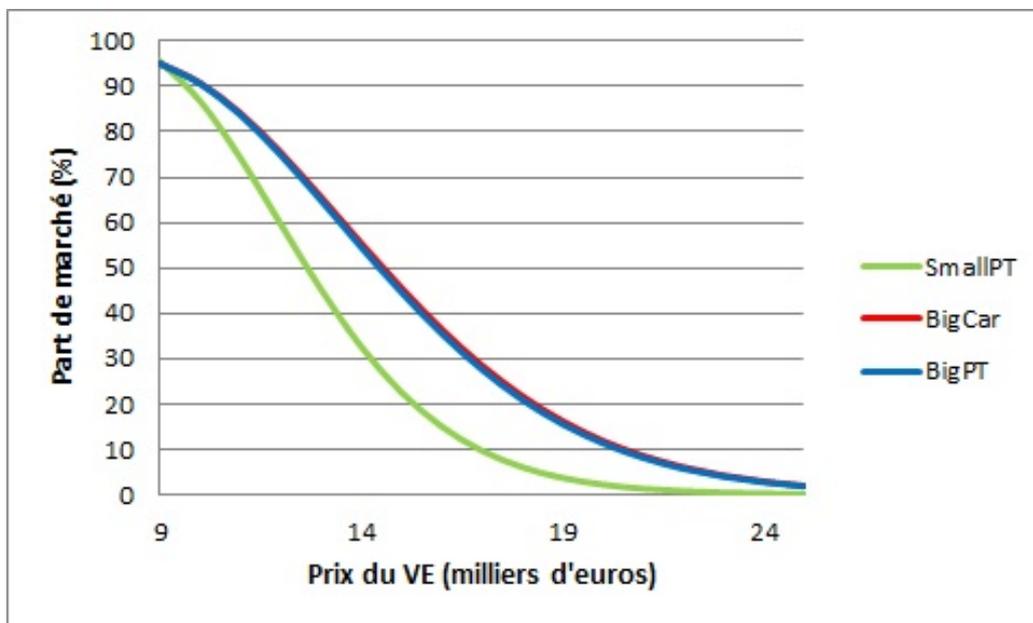


FIGURE 5.3 – Parts de marché du véhicule électrique parmi les voitures en fonction de son prix

Ile de France

En reproduisant le même exercice sur l'Ile de France avec NEDUM-2D, nous observons un effet beaucoup moins net. La ceinture verte ne permet de réduire les émissions que de 0.3% à 0% à mesure que le prix du véhicule électrique diminue. Nous trouvons donc une situation où l'association du véhicule électrique et d'une ceinture verte a le même effet que le véhicule électrique seul.

Cependant, les variations sont très faibles. Cela est dû à un impact très faible de la ceinture en Ile de France¹. Pour l'Ile de France nous observons, suite à la mise en place d'une ceinture verte (en l'absence de véhicule électrique), une distance moyenne parcourue par les usagers 0.4% plus faible.

Le faible niveau d'impact de la ceinture verte s'explique par le polycentrisme. En effet, la ceinture empêche l'urbanisation autour des limites extérieures de la ville, mais pas dans les zones moins denses entre les centres d'emploi. La densité augmente alors d'abord dans les zones de faible densité entre les centres d'emploi.

Additivité des politiques

La théorie économique classique préconise pour chaque objectif de la société (ici la réduction d'émissions de CO₂), un instrument politique (Tinbergen, 1952). Il faut alors au moins autant d'instruments indépendants que d'objectifs. La mise en oeuvre de plusieurs instruments poursuivant le même objectif engendrerait alors des sur-coûts et donc une perte d'efficacité (Bøhringer et al., 2008).

Néanmoins, l'utilisation de plusieurs instruments pour atteindre un objectif a été défendue par d'autres économistes comme le résume Lecuyer and Quirion (2013).

Ainsi, nous savons que certains instruments affectent plusieurs objectifs et ces politiques peuvent interférer entre elles (Oikonomou and Jepma, 2008).

De plus, ce résultat tient en présence d'un marché parfait. Dans un monde de second rang, un mix de politiques peut être plus efficace qu'une politique seule (Lehmann, 2012).

Cela amène certaines analyses à conclure que les objectifs environnementaux nécessitent la mise en oeuvre de mix de politiques où chacune des politiques doit répondre à un objectif précis en affectant le moins possible les autres objectifs (Knudson, 2009).

Néanmoins, le résultat de notre analyse amène des précisions sur l'influence des interactions de deux politiques sur le potentiel de réduction offert par une politique comme la subvention du véhicule électrique.

1. Nous rappelons que le périmètre de la ceinture verte a été défini par la zone urbanisée en 2015. La variation de population entre 2013 et 2050 est la même que dans la section précédente

Nous avons montré ici que deux politiques avec comme objectif commun de réduire les émissions des transports en ville, interfèrent car elles n'agissent pas sur les mêmes leviers pour réduire ces émissions. L'une d'entre elle s'appuie sur la réduction de l'intensité CO₂ des déplacements, l'autre s'appuie sur la régulation des distances parcourues. Nous avons aussi montré que ces interactions ne sont pas identiques selon l'ampleur des politiques déployées : certaines combinaisons de politiques sont plus efficaces que d'autres pour réduire les émissions.

Nos résultats nous permettent d'affirmer que dans les villes monocentriques, une politique de restriction à l'étalement urbain et une politique en faveur du déploiement du véhicule électrique agissent sur des mécanismes opposés et se neutralisent donc parfois. Pour certains niveaux de subvention du véhicule électrique, cette combinaison aboutit même à plus d'émissions que quand elles sont appliquées indépendamment, ce qui est le cas quand nous comparons l'association des deux politiques à l'utilisation du véhicule électrique seul.

Ce résultat peut donc se découper en deux affirmations : d'abord la politique de subvention au véhicule électrique et celle de limitation à l'étalement urbain sont des politiques sous-additives en terme d'émissions de CO₂, quelle que soit la ville considérée.

Ensuite, dans certaines configurations, l'addition de ces politiques réduit moins les émissions que la mise en oeuvre d'une seule d'entre elle (la subvention véhicule électrique).

Nous vérifions la sous-additivité des politiques en comparant, pour chaque mix de politiques et chaque ville, les émissions évitées dans le cas où on applique les deux politiques à la somme des émissions évitées de chaque politique effectuée seule (graphique 5.4). Nous trouvons systématiquement que les émissions évitées par l'application conjointe des deux politiques sont inférieures à la somme des émissions évitées par chacune des politiques.

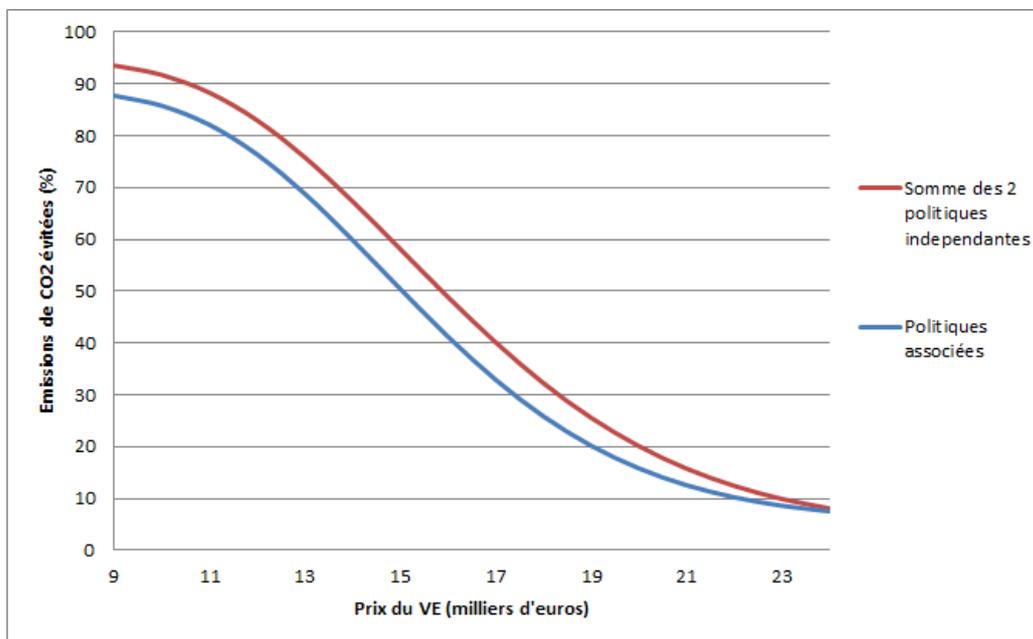


FIGURE 5.4 – Variation des émissions de CO₂ induite par l’association des deux politiques par rapport au cas où aucune politique n’est mise en oeuvre et somme des variations induites par chacune des politiques mise en oeuvre seule.

5.3 Discussion : tonnes de CO₂ évitées par véhicule, coût d’abattement, études de sensibilité

Potentiel du VE

Une autre manière d’illustrer les résultats obtenus est de comparer le nombre de tonnes de CO₂ évitées par véhicule électrique, pour différents niveaux de prix de ce véhicule et pour chaque ville, par rapport à la situation BAU (dans laquelle le véhicule électrique coûte 25 000 euros). Ce rapport nous permet de comparer le potentiel, en terme de CO₂ évité d’un véhicule électrique entre les villes, dans le cas où une ceinture verte est déployée et dans le cas où elle ne l’est pas. Nous voyons en premier lieu (graphique 5.5), que le niveau d’émissions évitées par un véhicule électrique, en l’absence de ceinture verte, n’est pas constant selon le niveau de prix (et donc le niveau de demande).

Le graphique 5.5 est un prolongement du chapitre précédent. Il montre que la disponibilité du véhicule électrique (pour chaque prix donné) est plus efficace dans une grande ville (en terme de CO₂ évité par rapport au nombre de véhicules

électriques utilisés). Cela est dû au fait que cette disponibilité concerne des utilisateurs qui roulent plus que dans la petite ville (distances moyennes plus longues).

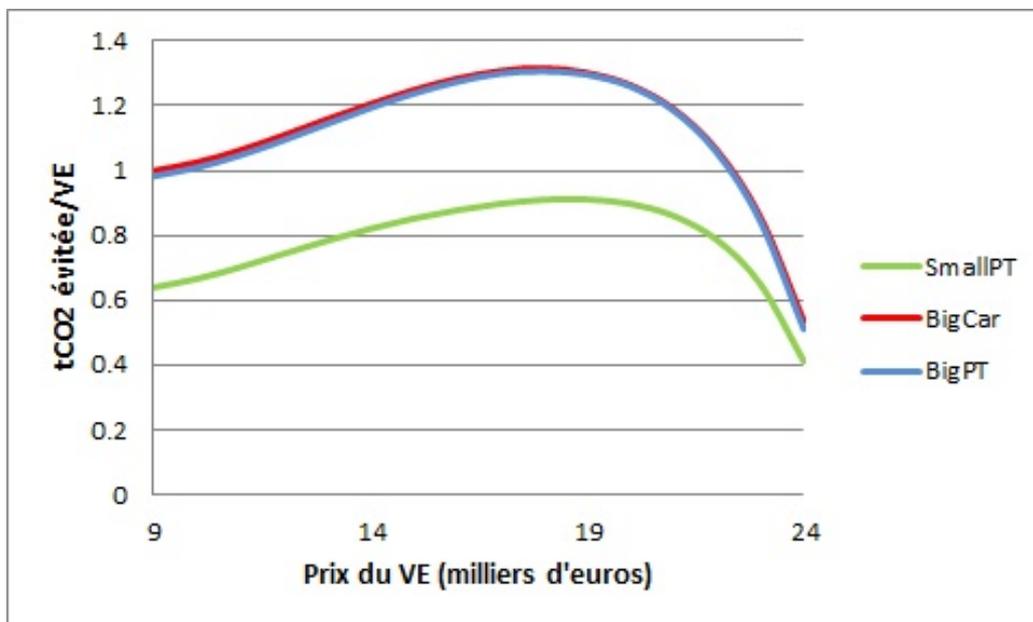


FIGURE 5.5 – Tonnes de CO₂ évitées par véhicule électrique utilisé en fonction de son prix, pour trois villes monocentriques circulaires

Nous remarquons aussi que les courbes ne sont pas monotones et qu'il existe donc un niveau de subvention pour lequel un véhicule électrique évite un volume d'émissions maximum. Au delà de ce niveau, les nouveaux utilisateurs de véhicules électriques ne roulent pas suffisamment pour maintenir le potentiel de réduction par véhicule.

Nous voyons sur ce graphique que le véhicule électrique à 18 000 € dans les grandes villes et 19 000 € dans la petite est le plus efficace. Cela correspond respectivement à une baisse de prix de 7 000 et 8 000€. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette baisse de prix ne correspond pas forcément qu'à une subvention directe équivalente. Elle peut découler d'une aide au déploiement de la filière, par exemple à la recherche sur les batteries, qui engendrerait une baisse de leur coût. De plus, le véhicule électrique à ces niveaux de prix doit aussi pouvoir se recharger facilement. Le coût global de la disponibilité du véhicule électrique à 18 000 ou 19 000€ ne correspond donc pas forcément au montant d'une simple subvention directe de celui-ci. Il n'est donc pas possible de déterminer un coût de la tonne de CO₂ évitée, à partir de ces résultats.

Or, pour un véhicule électrique à 18 000€, l'ajout d'une politique de limitation de l'étalement urbain à une politique de subvention au déploiement du véhicule électrique dans une grande ville a un effet presque nul sur les émissions. L'ajout d'une ceinture verte réduit le potentiel du véhicule électrique, à hauteur de ce que celle-ci permet d'éviter. Il n'est donc pas avantageux, en terme de réduction d'émissions, de mettre ces deux politiques en oeuvre simultanément.

Dans la petite ville, par contre, la combinaison des deux politiques, pour un véhicule à 19 000 €, réduit plus les émissions que la politique de développement du véhicule électrique seule, car ce véhicule n'est pas très utilisé pour ce niveau de prix. La ceinture verte réduit donc le potentiel en terme de réduction d'émissions du véhicule électrique mais pas autant que ce que celle-ci permet d'éviter. Le choix de mettre en oeuvre les deux politiques plutôt que d'introduire le véhicule électrique seul, peut alors dépendre du coût de ces deux politiques, que nous n'avons pas estimé ici.

Dans un second temps, nous reproduisons le même graphique en présence d'une ceinture verte afin d'illustrer son impact sur le potentiel de réduction du VE.

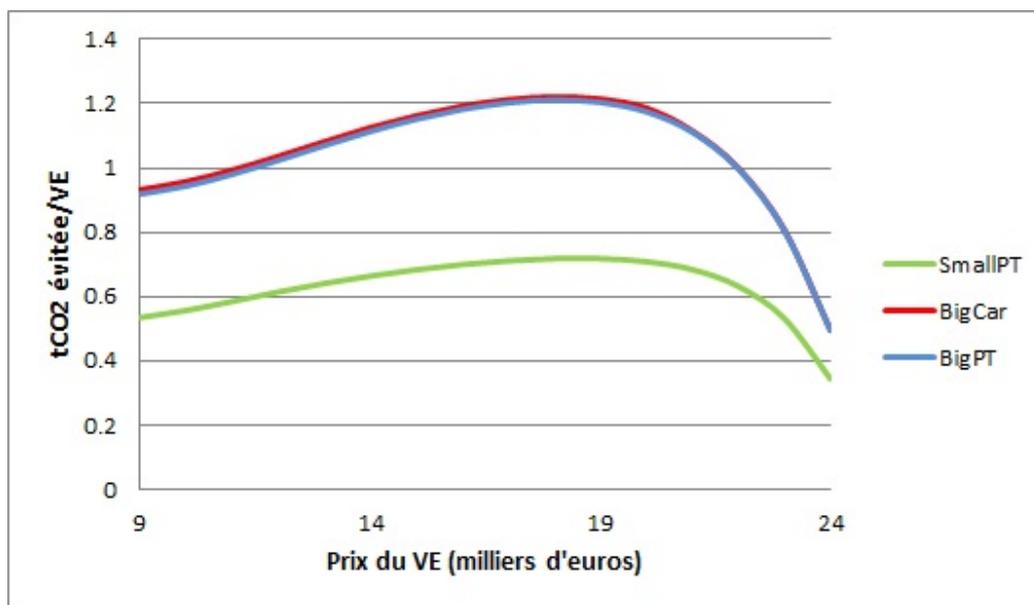


FIGURE 5.6 – Tonnes de CO₂ évitées par véhicule électrique utilisé en fonction de son prix, en présence d'une ceinture verte, pour trois villes monocentriques circulaires

Nous remarquons, en comparant le graphique 5.6 au graphique 5.5, que la ceinture verte diminue l'efficacité du véhicule électrique en tous points et pour

toutes les villes. Cela est dû au fait que la ceinture verte réduit les distances parcourues et donc le potentiel d'émissions évitées par chaque véhicule électrique.

Additivité des politiques et coûts d'abattement

Nous avons vu que les réductions d'émissions induites par politiques ne s'additionnent pas et sont parfois même plus élevées pour une politique seule que pour une association de politiques. Nous allons discuter de l'impact de ce résultat sur les coûts d'abattement des émissions. Ce chapitre ne traite pas de l'évaluation des coûts globaux des politiques selon le type de ville ou les interactions de ces politiques. Mais les résultats précédents nous permettent de discuter des coûts moyens d'abattement de ces politiques.

Le coût moyen d'abattement résume le coût de la tonne de CO₂ évitée par la mise en oeuvre d'une politique. Il est calculé à partir du coût total et du potentiel de cette politique (volume d'émissions évitées).

Dans le cas d'un outil tel que les courbes de coût d'abattement marginal (MACC), les potentiels des différentes politiques sont classés par coût moyen d'abattement. Elle permettent, selon le niveau d'abattement total désiré, de déterminer l'ensemble des solutions pour atteindre cet objectif dont les coûts moyens sont les plus faibles. Cette représentation laisse entendre que ces potentiels sont "empilables" et indépendants des autres politiques mises en oeuvre.

Or, si le volume d'émissions évitées par une politique, comme l'introduction du véhicule électrique à large échelle, est affecté par la présence d'une autre politique, comme la mise en place d'une ceinture verte, nous pouvons supposer que le coût moyen d'abattement le sera aussi. La façon dont le coût sera affecté dépend du potentiel de réduction de chaque véhicule et de la façon dont le coût total est influencé par le nombre de véhicules déployés.

En effet, appelons CT le coût total de déploiement du véhicule électrique. Celui-ci varie avec l'ampleur de la politique déployée, mais nous ne savons pas comment. Appelons CM_{VE} le coût moyen de cette politique par véhicule utilisé et VE le nombre de véhicules électriques utilisés. Le coût moyen d'abattement est noté CM_{CO_2} et CO_2 désigne la quantité d'émissions évitées.

Nous pouvons écrire :

$$CT = CM_{VE} \times VE = CM_{CO_2} \times CO_2 \quad (5.1)$$

Et alors :

$$\frac{CM_{VE}}{CM_{CO_2}} = \frac{CO_2}{VE} \quad (5.2)$$

L'élément de droite de l'égalité 5.2 est le niveau d'émissions évitées par véhicule électrique utilisé. Nous avons calculé ce rapport dans la section précédente et nous savons qu'il n'est pas constant selon la ville selon le prix du véhicule électrique (donc selon l'ampleur de la politique de déploiement) et qu'il est influencé par la présence d'une ceinture verte.

Si nous supposons que CM_{VE} est constant selon nombre total de VE, selon la ville et en présence d'une autre politique ou non, alors, nous pouvons en déduire que le coût moyen d'abattement n'est pas constant selon l'ampleur de la politique (nombre de VE), selon le type de ville, et est affecté par la présence d'une autre politique. Le coût de la tonne de CO_2 évitée serait plus élevé dans les petites villes que dans les grandes villes. Il serait à son minimum pour un véhicule à 18 000 euros dans les grandes villes et 19 000 dans les petites. Enfin, dans tous les cas, ce coût augmenterait en présence d'une ceinture verte (sans compter le coût supplémentaire de la mise en oeuvre d'une ceinture).

Cependant les hypothèse que nous venons de faire sur le coût moyen de déploiement du véhicule électrique (CM_{VE}) sont discutables.

Considérer que celui-ci n'est pas affecté par la présence d'une ceinture verte peut paraître raisonnable car ces deux politiques n'interfèrent pas, à priori, dans leur mise en oeuvre.

L'hypothèse selon laquelle ce coût moyen est identique selon les villes est simplificatrice. Le coût du déploiement d'un réseau de recharge connaît sans doute des effets d'économie d'échelle : dans les grandes villes, la densité des habitants étant supérieure en tous points, les points de recharge disposeront de plus de prises, ce qui diminue le coût par véhicule rechargé.

Enfin, l'hypothèse d'un coût moyen de déploiement constant, quelque soit le niveau d'effort pour rendre le véhicule électrique disponible, donc quelque soit le prix auquel il est proposé et la quantité de véhicule demandée, est discutable. Rien ne nous permet d'affirmer que de proposer, par exemple, un véhicule à 19 000 euros au lieu de 21 000 dans BigPT, qui permet de multiplier par deux le nombre d'utilisateurs, coûtera exactement deux fois plus cher au total et aura donc un coût moyen identique.

Malgré cela, il nous semble raisonnable de conclure que si les potentiels de réduction des politiques sont dépendants de certaines autres politiques mises en oeuvre, et que ce lien varie selon les villes, les coûts d'abattement d'une politique (ici le déploiement de la filière du véhicule électrique) ne sont pas non plus indépendants de certaines autres politiques (ici la ceinture verte) et du type de ville.

Influence du poids du coût dans les choix

Nous avons utilisé, dans ce chapitre, un paramètre de logit élevé ($\alpha = 10$), exprimant une faible variabilité dans les choix des ménages et permettant aux

différences de coût des véhicules de jouer un rôle important dans le choix du véhicule (voir introduction et chapitre 2). Notamment, lorsque le prix du véhicule est faible (9000 €), un logit élevé entraine le choix de ce véhicule par la majorité des ménages (voir graphique 5.3). Inversement un paramètre de logit faible entraine une plus grande hétérogénéité des choix, et malgré un prix du véhicule électrique faible, une partie des ménages choisit un véhicule thermique. Afin d'observer l'importance de ce logit, nous reproduisons l'exercice de ce chapitre avec un paramètre faible ($\alpha = 1$). Le graphique 5.7 montre que l'effet de la ceinture verte sur les émissions en présence du véhicule électrique est presque constant pour tous les prix de ce véhicule.

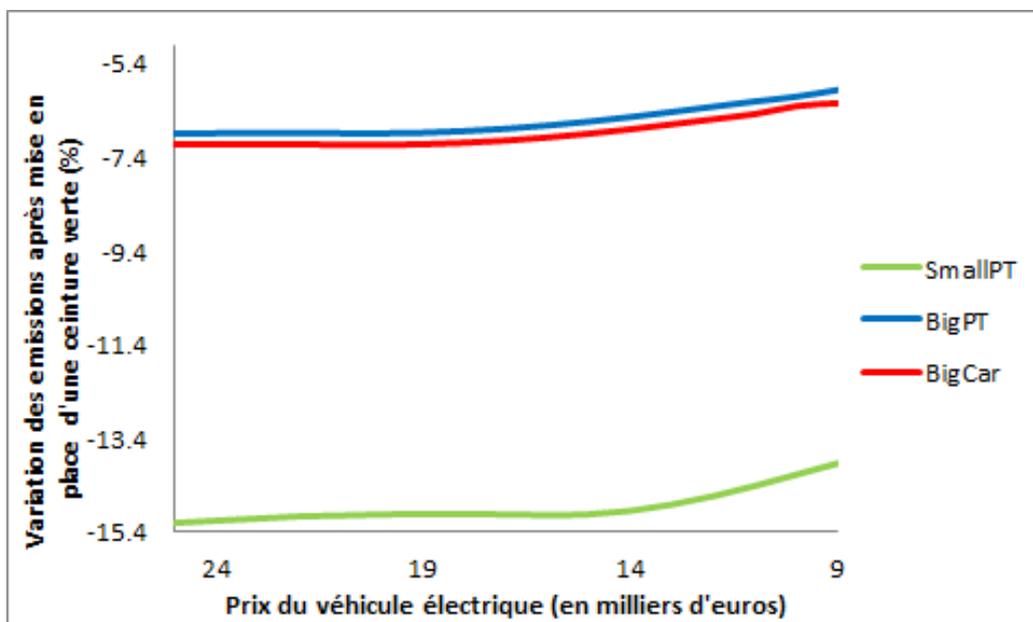


FIGURE 5.7 – Impact de la ceinture verte sur les émissions de CO₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un logit faible

Cela est en partie dû au fait, qu'avec ce paramètre de logit faible, la part de marché du véhicule électrique dépasse à peine 50%, même pour le prix du véhicule le plus bas (9000€). Les choix sont donc fortement lissés, le coût a peu d'influence sur la répartition des usagers entre les trois technologies.

Entre 14 000 et 9 000€, la réduction d'émissions en présence de la ceinture verte commence à diminuer légèrement.

Pour compléter cette analyse, nous répétons l'étude de l'impact du logit avec une valeur intermédiaire ($\alpha = 5$). Nous observons sur le graphique 5.8 que l'in-

fluence de la ceinture verte est visible et se renforce entre 15 000 et 11 000€, mais l'ampleur de cette influence est plus faible qu'avec un logit élevé.

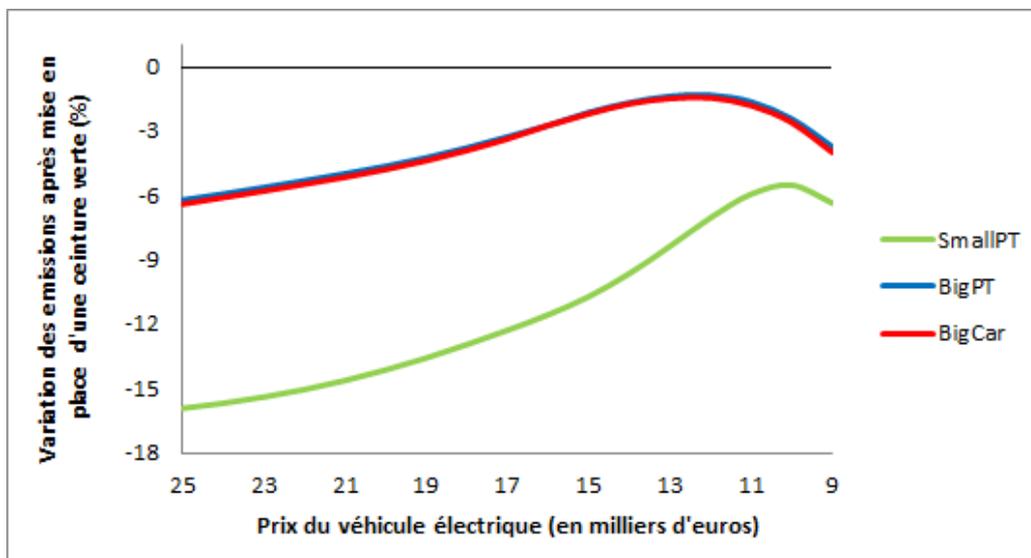


FIGURE 5.8 – Impact de la ceinture verte sur les émissions de CO₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un logit intermédiaire

L'importance accordée au coût par rapport à d'autres facteurs dans le choix du véhicule par les ménages, est donc déterminante de l'ampleur des résultats. Le choix de ce paramètre doit, selon nous, être cohérent avec le scénario développé. Ainsi, choisir un paramètre de logit faible, donc une grande variabilité dans les choix des ménages, et une influence du coût plutôt faible, serait cohérent avec un scénario sur le prix du carburant faible. Inversement avec des prix des énergies élevés, le coût pourrait devenir un critère primordial et la variabilité des choix en réponse au coût serait faible.

Influence du scénario sur le prix du carburant

Afin de mieux saisir la portée des résultats trouvés dans la section précédente, il convient aussi d'observer l'influence du prix du carburant.

Nous répétons l'exercice de ce chapitre avec un scénario des prix du carburant plus élevé. Nous utilisons pour cela le scénario haut de l'EIA (EIA, 2013). Ce scénario implique une augmentation annuelle du prix du carburant de 2,9% au lieu de 1,5% jusqu'ici. Cette augmentation annuelle reste, par exemple, inférieure à celle du scénario haut de la Stratégie nationale bas carbone pour la période 2013-

2023 (3,5%). Le coût du kilomètre de chacune des technologies est alors le suivant (Tab.5.2) :

	Essence	Diésel	Électrique
Prix du carburant en 2015 (en €/l ou /kWh)	1.23	1.11	0.14
Coût du kilomètre en 2015 (en €/100km)	8.2	5.9	2.8
Prix du carburant en 2050 (en €/l ou /kWh)	3.61	3.44	0.20
Coût du kilomètre en 2050 (en €/100km)	24.1	18.5	4

TABLE 5.2 – Coût d’usage du kilomètre en 2015 et scénario haut pour 2050

Nous observons sur la figure 5.9 que les résultats de ce chapitre sont aussi valables pour un scénario de prix des carburants élevés. Cependant leur ampleur est différente.

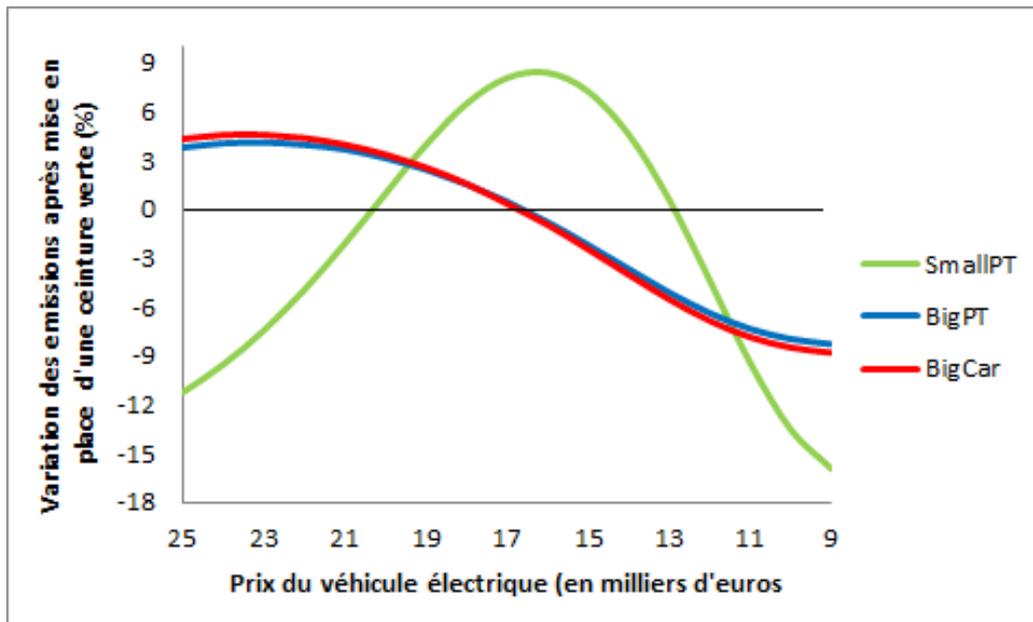


FIGURE 5.9 – Impact de la ceinture verte sur les émissions de CO₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un scénario de prix des énergies élevés

La plage de prix du véhicule électrique pour lesquels l’addition des deux politiques est moins efficace que le véhicule électrique seul est plus étalée dans toutes les villes. Dans la petite ville, quand le véhicule électrique est compris entre 13 000 et 20 000€, la mise en oeuvre de la ceinture verte fait augmenter

les émissions. Dans les grandes villes, la plage de prix concernée s'étend pour tous les prix supérieurs à 18 000€. Sur ces intervalles de prix, la hausse des émissions due à la mise en oeuvre de la ceinture verte est aussi plus élevée. Elle atteint 8.5% d'augmentation pour un véhicule électrique à 16 000€ dans la petite ville en présence d'une ceinture verte, par rapport au cas sans ceinture verte.

La hausse du prix du carburant rend le véhicule intéressant pour des prix plus élevés et renforce les résultats obtenus dans la section 5.2.

Pour un scénario de prix plus faibles, nous utilisons le scénario bas de l'EIA (EIA, 2013). Ce scénario suppose une stabilisation du prix du pétrole et donc du carburant autour de la valeur actuelle (2015). Nous reprenons donc les calculs pour des prix du carburant en 2050 identiques à ceux de 2015.

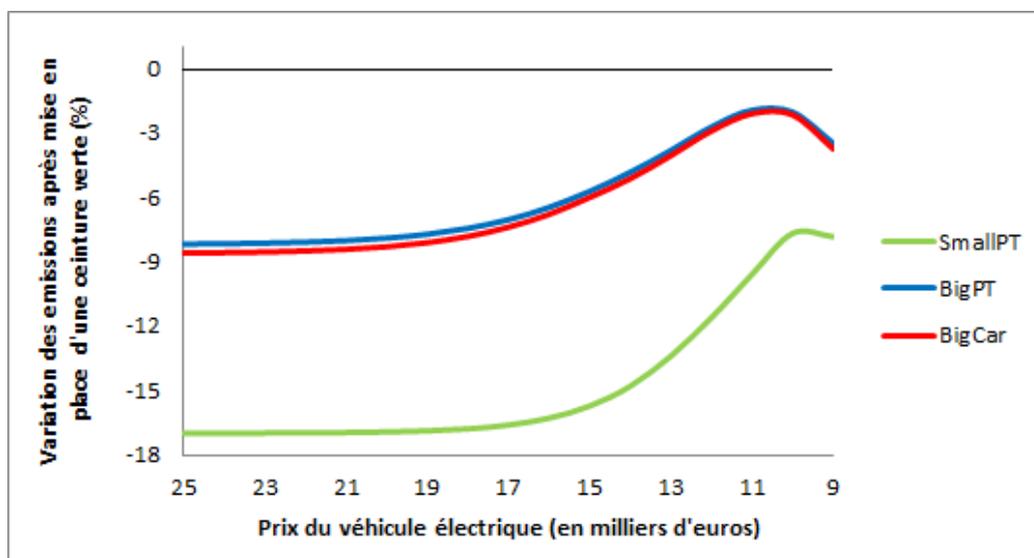


FIGURE 5.10 – Impact de la ceinture verte sur les émissions de CO₂ en fonction du prix du véhicule électrique avec un scénario de prix des énergies stables

Avec des prix des énergies faibles en 2050, nous remarquons l'effet inverse (Graph.5.10). Les résultats trouvés en section 5.2 sont atténués. L'efficacité, sur la quantité de CO₂ évitée, de l'ajout d'une ceinture verte diminue à mesure que le prix du véhicule électrique diminue. Cependant, contrairement aux résultats obtenus en section 5.2, le potentiel de diminution des émissions reste toujours présent, et dans le pire des cas, l'ajout d'une ceinture verte permet de diminuer les émissions de 7% dans la petite ville et de 2% dans la grande ville.

Pour résumer, ces analyses sur l'influence des paramètres sur les résultats nous montrent que pour des prix des énergies qui sont faibles et pour un paramètre de logit faible, et dans une moindre mesure pour un niveau intermédiaire, la ceinture

verte permet toujours de réduire les émissions, quel que soit le prix du véhicule électrique. Les deux politiques interfèrent peu. Ceci nous permet de souligner les limites de nos résultats face à l'incertitude concernant les scénarios de prix et les futurs déterminants des choix de technologie de véhicule.

5.4 Conclusion

Les réductions d'émissions permises par le déploiement du véhicule électrique dépendent de la présence d'autres politiques. Elles dépendent notamment, des politiques, comme la ceinture verte, qui s'appuient sur un levier de réduction différent (réduction des distances parcourues). Ainsi, l'association du déploiement du véhicule électrique et de la ceinture verte est sous-additive et peut même, pour certains niveaux de déploiement du véhicule électrique, amener plus d'émissions que ce déploiement seul.

Nous avons aussi montré que l'ampleur de ce résultat diffère selon la ville étudiée. Pour considérer le potentiel de réductions d'émissions de plusieurs politiques simultanées en ville, il est donc nécessaire de tenir compte des interactions que peuvent avoir les leviers sur lesquels celles-ci agissent ainsi que du type de ville où elles sont mises en oeuvre.

Cependant, l'ampleur des résultats trouvés varie selon les paramètres et scénarios choisis. L'importance accordée au coût dans les critères de choix de la technologie de leur véhicule par les ménages influence les interactions entre la ceinture verte et le déploiement du véhicule électrique.

Si l'on considère que le coût (ATCO) d'une technologie est un déterminant primordial pour expliquer les parts de marché de chaque technologie, alors les interactions entre des politiques jouant sur des leviers distincts sont à prendre en compte dans l'évaluation de leur potentiel. En effet, pour certains niveaux de prix du véhicule électrique, la mise en oeuvre d'une ceinture verte peut augmenter les émissions de CO₂. De même, si l'on suppose des prix des carburants élevés, on constate que le résultat est renforcé.

Les résultats trouvés concernant le potentiel de réduction des politiques ci-dessus doivent aussi impacter le coût de mise en oeuvre de ces dernières. Nous ne proposons pas d'évaluation des coûts totaux de ces politiques. Cependant, si nous supposons, que le coût par véhicule électrique déployé n'est pas impacté par la présence d'une ceinture verte, nous pouvons dire que le coût d'abattement moyen (coût de la tonne évitée) est plus élevé dans les petites villes que dans les grandes et que celui-ci augmente en présence d'une ceinture verte dans toutes les villes. Il y a deux raisons à cela : la diminution de l'efficacité du véhicule électrique en présence d'une ceinture verte et le coût de la ceinture verte.

Dans ce chapitre et le précédent nous avons affiné l'évaluation du potentiel de réduction des émissions associé véhicule électrique en tenant compte de la structure de la ville, autrement dit, de l'utilisation qui est faite de ce véhicule par les usagers. Dans le chapitre suivant, nous allons désormais affiner l'évaluation du coût de ce véhicule pour les automobilistes. Nous nous efforcerons à nouveau de tenir compte de l'usage qui est fait de ce véhicule par les ménages. Nous intégrerons aussi à l'analyse l'incertitude qui entoure le déploiement de ce véhicule.

Chapitre 6

Évaluation d'une valeur d'option associée à la disponibilité du véhicule électrique

L'évaluation du coût du véhicule électrique pour la société est un élément central dans la décision de déployer cette solution à grande échelle pour réduire les émissions de CO₂.

Pour les usagers, les analyses considèrent que le véhicule électrique est intéressant économiquement si le prix de la batterie devient suffisamment faible et les prix du pétrole suffisamment élevés. Les comparaisons avec les autres véhicules s'appuient sur des calculs de coût annuel de possession ("total cost of ownership" ou TCO) pour un ménage représentatif (Crist, 2012; Prud'homme and Koning, 2012) et un scénario de prix des énergies. La plupart des études montrent que le ménage représentatif ne voyage pas assez pour tirer un bénéfice économique de l'achat d'un véhicule électrique (CGDD, 2011; van Vliet et al., 2011; Propfe et al., 2012). Ces conclusions plaident en faveur de l'abandon ou du report du déploiement d'une solution comme le véhicule électrique.

Dans cet article nous ajoutons deux éléments au calcul traditionnel du TCO : l'hétérogénéité des ménages et l'incertitude sur les prix des énergies et des batteries. Nos résultats nous permettent d'affiner l'évaluation du coût du véhicule électrique en valorisant l'incertitude dans une société de conducteurs hétérogènes en s'appuyant sur des données françaises. Cette évaluation et sa comparaison avec le coût des véhicules classiques, nous permettent de calculer l'effort financier qui pourrait être fait dès aujourd'hui pour rendre ce véhicule disponible.

Nous allons décrire, dans un premier temps, le concept de valeur d'option, qui nous permet de rapprocher la disponibilité du véhicule électrique d'une option financière.

Puis nous détaillerons le calcul de cette valeur d'option pour les automobilistes français et exposerons les résultats obtenus.

Enfin nous effectuerons des études de sensibilité sur les paramètres et discuterons des moyens d'utiliser cette valeur d'option.

6.1 La disponibilité du véhicule électrique comme une option pour la société

Les principales barrières à l'utilisation à large échelle du véhicule électrique concernent la capacité de la batterie, le déploiement d'un réseau de recharge assez large et la vitesse de charge (voir Chapitre 1). Les perspectives d'amélioration dont pourrait bénéficier ce véhicule sont réelles, elles ont été décrites dans le Chapitre 1. Cependant, la réalisation de ces améliorations est conditionnée au développement de projets de long terme.

Ces barrières font l'objet de nombreuses recherches encouragées par les industriels et l'Etat. En France, par exemple, la recherche publique pour l'amélioration du véhicule électrique a représentée environ 150 millions d'euros sur la période 2007-2015 (Zubaryeva and Thiel, 2013)¹. Au total en Europe, 1,9 milliard d'euros ont été dépensés pour financer les projets publics de recherche sur le véhicule électrique sur cette même période. Ces évaluations ne considèrent que les investissements publics dans la recherche et développement.

Une évaluation complète des coûts associés au déploiement du véhicule électrique doit tenir compte des coûts des politiques pour la mise en route de la filière industrielle (recherche et développement, production, distribution, maintenance), du déploiement des infrastructures nécessaires, notamment des recharges, et de leur maintenance ou encore d'éventuelles incitations financières pour l'adoption à large échelle de ce véhicule.

Ces dépenses peuvent être rapprochées des bénéfices potentiels que pourraient apporter l'utilisation à grande échelle du véhicule électrique pour la société en terme, notamment, d'émissions évitées, de réduction du bruit et de réduction de la dépendance aux énergies fossiles. Une partie de ces bénéfices potentiels peut être mesurée par certains des coûts externes associés à l'utilisation du véhicule thermique. Becker et al. (2012) évaluent par exemple que l'ensemble des coûts externes de l'automobile aujourd'hui en France représente entre 35 et 50 milliards d'euros par an. Dans la plupart de ces calculs de coûts externes, les coûts

1. Ce rapport de la Commission Européenne a aussi mis en place un site qui permet de parcourir l'ensemble des projets publics de recherche pour le déploiement du véhicule électrique et leur budget : <http://iet.jrc.ec.europa.eu/ev-radar/>

d'évitement des émissions de CO₂ sont pris en compte et le coût de déploiement du véhicule électrique en fait partie ; il est donc déjà intégré.

Toutefois, la disponibilité du véhicule électrique possède aussi une valeur pour la société en tant qu'option pour faire face à des prix des énergies élevés. Nous entendons par disponibilité, la possibilité d'un déploiement à large échelle d'un VE, ayant levé l'essentiel des barrières à son utilisation. Les efforts d'aujourd'hui pour développer la filière du véhicule électrique représentent l'investissement dans une option pour l'ensemble des automobilistes, qu'ils pourront utiliser dans le futur en se déplaçant avec ce véhicule. La valeur associée à cette option est un élément d'évaluation supplémentaire dans l'évaluation des coûts.

La notion d'option en économie recouvre trois concepts. Une première approche s'appuie sur l'aversion au risque des agents. L'option correspond alors à la disponibilité à payer pour réduire le risque inhérent à une décision (Cicchetti and Freeman III, 1971; Weisbrod, 1964). Cette approche est statique, l'agent compare une situation certaine à une situation incertaine dans un monde sans temporalité (Schmalensee, 1972). Henry (1974) souligne que cette approche ne permet pas de considérer la possibilité de reporter la décision dans le temps.

Henry (1974), Arrow and Fisher (1974) et Hanemann (1989) introduisent alors la notion d'irréversibilité dans le processus de décision. La valeur d'option (appelée aussi quasi-option) introduit donc l'irréversibilité pour justifier la possibilité de reporter la décision d'investissement (par exemple la destruction d'une forêt pour y développer une activité économique) et l'attente afin de récolter plus d'informations. Cette quasi-option s'attache donc à la valeur de l'information quand l'attente est possible. Elle peut être strictement positive, même si l'agent n'est pas averse au risque.

Puis Dixit and Pindyck (1994) ont développé une approche (real option value) qui calcule la valeur nette de l'attente dans le cas d'un investissement, dans une situation où plus d'information peut être disponible. En comparaison avec l'approche de quasi-option, l'option réelle permet de tenir compte, en plus de la valeur de l'information, de la valeur du report de l'investissement indépendamment de l'information reçue (Traeger, 2013). Cette approche permet aux entreprises de considérer des investissements réels comme des options financières.

Notre approche s'apparente aux analyses d'options réelles (ROA) par l'analogie qui est faite avec une option financière. Cependant, la ROA s'attache à mesurer la valeur que confère la possibilité d'attendre une période pour prendre une décision. Dans notre approche, l'attente entre les deux périodes relève du temps de construction nécessaire à la filière et non d'un choix volontaire permettant une plus grande flexibilité.

L'analogie avec une option d'achat financière (call option) réside dans l'idée que les automobilistes ont la possibilité d'acheter une option aujourd'hui sur la disponibilité du véhicule électrique (à un prix donné) en investissant dans le dé-

ploiement de la filière, et pourront exercer cette option dans le futur en achetant ou non ce véhicule, selon le niveau des prix du carburant.

Mais cette analogie n'est pas parfaite. En effet, la particularité de cette option que représente la disponibilité du véhicule électrique est que la décision d'achat de l'option (l'investissement dans la filière) est une décision collective. Le véhicule électrique sera disponible pour tout le monde ou ne sera disponible pour personne, il peut être vu comme un bien public (non excluabilité). Inversement, l'exercice de l'option est une décision individuelle qui va dépendre du choix de chaque automobiliste d'acheter ou non un véhicule électrique.

La disponibilité du véhicule électrique aurait aussi pu être conçue comme une assurance ou une couverture contre le risque d'un carburant cher. Mais le mot assurance sous entend que le risque est transféré à quelqu'un d'autre. Le mot couverture sous entend que le risque est diminué, via l'engagement à acheter ou vendre à un prix donné. Nous avons préféré utiliser la notion d'option qui ne sous entend rien quant à l'entité qui supporte le risque ou la diminution de ce risque.

Nous pouvons résumer le déroulement du processus de déploiement du véhicule électrique avec l'arbre de décision suivant (6.1). Nous distinguons dans un premier temps deux mondes, un dans lequel le véhicule électrique est disponible et l'autre non. Dans chacun de ces mondes les agents font face aux prix des énergies et dans le monde avec véhicule électrique décident individuellement de l'acheter ou non.

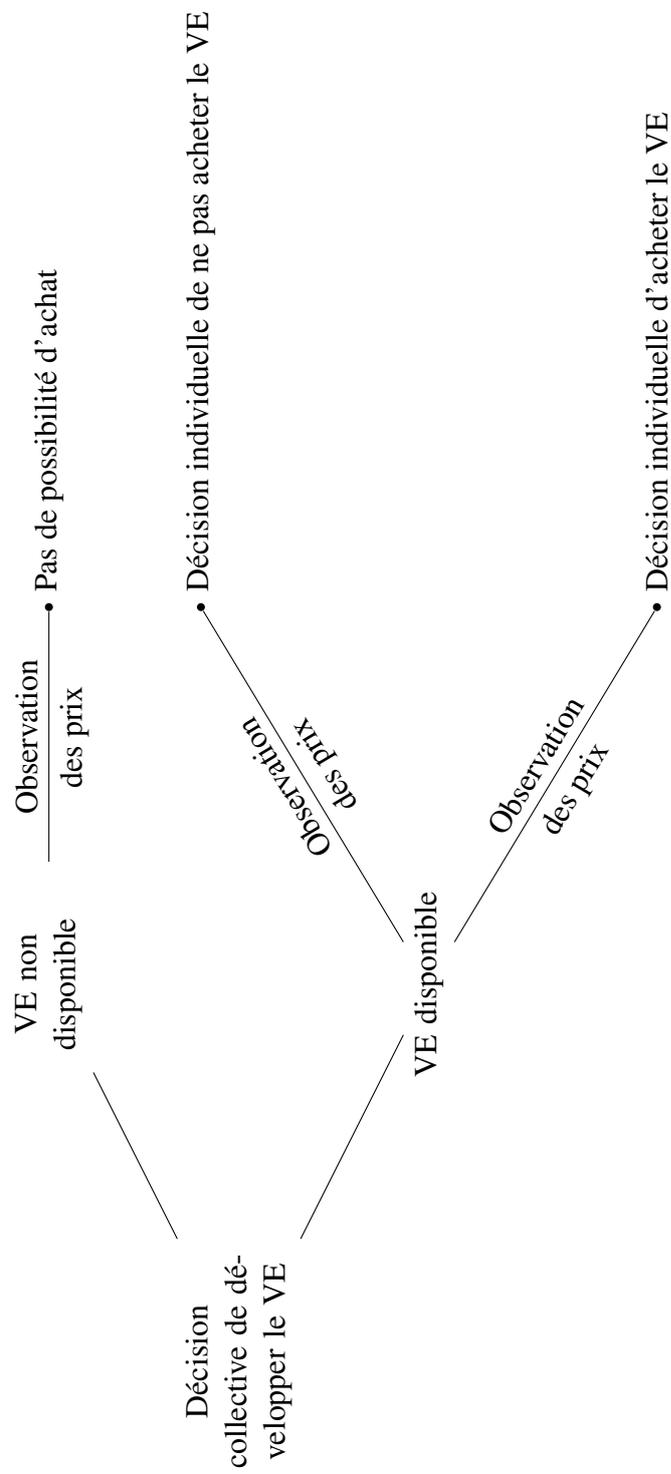


FIGURE 6.1 – Arbre de décision pour la disponibilité du VE

Une discussion sur la possibilité de mettre en place une telle option et les agents qui pourraient l'utiliser est développée en section 3.

L'option, telle qu'elle est décrite ci-dessus a une valeur, qui correspond à la valeur de la disponibilité du véhicule électrique pour les automobilistes. Le chapitre s'attache ici à décrire le calcul de cette option et à en donner une évaluation chiffrée pour la France.

6.2 Méthode : prise en compte des incertitudes et de l'hétérogénéité

La valeur de l'option que le développement de la filière du véhicule électrique représente est calculée à partir du bénéfice financier que les ménages peuvent retirer de la disponibilité à l'achat de ce véhicule relativement à la situation où celui-ci ne l'est pas. La décision du déploiement de la filière se fait dans un environnement incertain, notamment en ce qui concerne les futurs prix des énergies. De plus, les ménages qui prennent cette décision sont hétérogènes, notamment dans leur utilisation de la voiture. Cette incertitude et cette hétérogénéité des ménages sont à l'origine de la valeur non nulle de l'option. Ainsi, ce calcul se distingue de la plupart des calculs de coût du véhicule électrique qui sont effectués pour un ménage type et seulement quelques scénarios de prix des énergies. Ici l'incertitude elle-même joue un rôle dans la valeur de l'option que le véhicule électrique représente.

La prime pour l'option (le surplus que l'agent paye pour avoir une option) est calculée comme l'espérance de gain apporté par la disponibilité du véhicule électrique. Plus précisément dans cet exercice, la prime d'option est la différence entre l'espérance de coût de possession annualisé et actualisé (ATCO) d'un véhicule dans un monde futur avec véhicule électrique et l'espérance de coût de possession annualisé et actualisé (ATCO) d'un véhicule dans un monde sans véhicule électrique.

Par la suite l'expression "valeur d'option" sera utilisée pour éviter toute confusion avec la notion de prime de risque, qui sous-entend la prise en compte d'averssion au risque, ce qui n'est pas le cas ici.

Pour cela nous calculons donc les ATCO de la manière indiquée dans le chapitre 2 pour chaque technologie (Eq.6.1. C_{Inv} est le prix du véhicule, L la distance parcourue sur une année, c_j est la consommation kilométrique de la technologie j

et p_j le prix du carburant utilisé par la technologie j , i est le taux d'actualisation et T la durée de possession de la voiture.

$$ATCO = \frac{C_{Inv}}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+i)^t}} + L \cdot (c_{fuel} \cdot p_{fuel} + c_{elec} \cdot p_{elec}) \quad (6.1)$$

Nous ne gardons que l'ATCO le moins élevé pour chaque ménage en fonction des prix des énergies. Nous avons ainsi des distributions d'ATCO selon les ménages et selon les prix des énergies. Nous pouvons ensuite calculer l'espérance d'ATCO moyen pour l'ensemble des ménages. La valeur d'option est la différence entre cette moyenne pour un monde futur avec seulement la technologie thermique et un monde qui dispose aussi du véhicule électrique à grande échelle.

Nous pouvons écrire ce montant de la manière suivante :

$$VO = \frac{1}{N} \sum_{n \in N} E(\min(ATCO_{class}^n, ATCO_{effi}^n)) - \sum_{n \in N} E(\min(ATCO_{class}^n, ATCO_{effi}^n, ATCO_{ve}^n)) \quad (6.2)$$

Ou encore autrement :

$$VO = \frac{1}{N} \sum_{n \in N} E[\max\{0, (\min(ATCO_{class}^n, ATCO_{effi}^n) - ATCO_{ve}^n)\}] \quad (6.3)$$

Les notations sont les suivantes : N le nombre de ménages, $ATCO_{class}^n$ la variable aléatoire associée au coût de possession annualisé d'un véhicule thermique classique pour le ménage n , la même notation est utilisée pour le véhicule thermique efficace (*effi*) et le véhicule électrique (*ve*) et E désigne l'espérance mathématique.

Nous supposons que les ménages auront le choix entre deux ou trois types de technologies (selon le monde dans lequel on se situe). Le premier est un véhicule thermique classique, le second est un véhicule thermique efficace, qui a bénéficié d'amélioration en terme de consommation de carburant, le troisième est un véhicule électrique. Les caractéristiques des ces véhicules sont explicitées dans le tableau 6.1.

Le calcul est effectué pour des données de kilométrages annuels français (ENTD, 2008) et des distributions de prix des énergies s'appuyant sur les projections de EIA (2013).

Les données utilisées sont détaillées dans le tableau 6.2.

	Classique	Efficace	Electrique
Prix (€)	16 000	22 000	29 000
Consommation de carburant (L/100km)	6.8	4	0
Consommation d'électricité (kWh/100km)	0	0	20
Consommation énergétique (kWh/100km)	68	39.5	20

TABLE 6.1 – Caractéristiques des différentes technologies

Description	Unité	Valeur	Source
Moyenne des kilomètres	km/an	12 800	ENTD (2008)
Ecart type des kilométrages	km/an	9 800	ENTD (2008)
Durée de vie des véhicules	ans	15	ENTD (2008)
Taux d'actualisation	.	4%	Lebegue (2005)
Contenu carbone du carburant	gCO ₂ /l	2500	Observatoire de l'énergie (2007)
Contenu carbone de l'électricité	gCO ₂ /kWh	86	Doucette and McCulloch (2011)
Taxe carbone	eur/tCO ₂	56	Quinet et al. (2009)
Prix moyen du carburant en 2020	€/l	1.5	EIA (2013)
Prix moyen de l'électricité en 2020	€/kWh	0.14	EIA (2013)

TABLE 6.2 – Paramètres pour le calcul des ATCO en 2020

Dans un second temps nous nous intéressons à l'incertitude qui pèse sur le futur prix du véhicule électrique en introduisant une distribution de prix du véhicule au lieu d'un prix fixe. Nous nous éloignons un peu plus de l'analogie avec l'option financière car celle ci porte sur la possibilité d'acheter un "stock" à un prix donné. Ici l'option offre uniquement la possibilité d'acheter le véhicule électrique et son prix est incertain.

6.3 Résultats : valeurs d'option en France

La première ligne du tableau 6.3 donne les valeurs d'option par ménage et pour une année (2020), pour les différents mondes futurs sur lesquels porte l'option et quelques statistiques permettant d'évaluer leur distribution.

Nous avons aussi calculé les valeurs d'option dans le cas où nous introduisons une contrainte sur l'autonomie de la batterie à 150km par jour. Ceci nous permet d'évaluer un monde dans lequel le véhicule électrique serait disponible sans progrès sur l'autonomie. Ce monde est moins plausible car la disponibilité du véhicule électrique à large échelle passe en partie par l'amélioration de son autonomie. Néanmoins, la valeur d'option est toujours non nulle (environ 30 euros en moyenne) ce qui permet de montrer que même si toutes les améliorations de la technologie du véhicule électrique ne sont pas au rendez-vous, sa disponibilité a toujours une valeur pour un certain nombre de ménages.

	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Valeur d'option pour prix incertains et ménages heter. (€)	70	165	0	3250
Valeur d'option avec contrainte d'autonomie (€)	30	125	0	3250
Valeur d'option avec incertitude sur prix des batteries (€)	110	170	0	3280

TABLE 6.3 – Valeur d'option pour différentes disponibilités du véhicule électrique

L'incertitude sur le prix de la batterie augmente la valeur d'option. Le phénomène qui explique cette augmentation est le suivant : le calcul de la valeur d'option tronque les valeurs négatives à zéro. En effet, si le véhicule électrique est plus cher que les autres véhicules pour certains ménages, ceux-ci ne l'achètent pas, leur valeur d'option est alors zéro. Ainsi, quand l'incertitude sur le prix du véhicule électrique augmente, les écarts entre les ATCO peuvent être plus grands (en positif et en négatif), mais les cas où le véhicule électrique n'est pas intéressant (écart négatif) sont toujours comptés comme zéro. Ces écarts comptent donc

plus dans les positifs que dans les négatifs et la valeur d'option moyenne est alors plus élevée.

Cet effet est renforcé par les formes des distributions choisies. La distribution choisie pour le prix du véhicule électrique est une distribution log-normale. Celle-ci reflète le fait que la plupart des études cherchant à prévoir les évolutions de prix de la batterie s'accordent à dire que celui-ci va baisser. Ainsi, même si la moyenne du prix du véhicule est identique à celui choisi lorsqu'il était fixe, la distribution des prix n'est pas symétrique. La distribution des ménages n'est pas non plus symétrique et ressemble à une distribution log-normale, avec un corps concentré autour de la moyenne et une queue plate et étendue. Dans les cas les plus fréquents, où le prix du véhicule baisse, un nombre croissant de ménages est intéressé par l'achat du véhicule. Cela fait alors fortement augmenter la valeur d'option moyenne. Inversement, si le prix du véhicule augmente, même s'il peut augmenter très fortement dans certains cas, seuls quelques ménages supplémentaires se désintéressent du véhicule, faisant ainsi baisser faiblement la moyenne de la valeur d'option.

Les valeurs d'option sont calculées pour une année et par ménage, il est facile d'additionner ces valeurs sur l'ensemble des ménages automobilistes afin de mesurer cette valeur pour l'ensemble des automobilistes.

Cette simple addition sous-entend toutefois que l'ensemble des ménages choisit la technologie de tous les véhicules à une année donnée. En réalité le renouvellement du parc de véhicules se fait progressivement. Cependant cette approximation peut être valable si on suppose que tous les ménages ont fait un choix rationnel les années précédentes, en tenant compte des distributions de prix du carburant qui pourraient exister à l'année où le calcul est fait.

Enfin, une fois le déploiement de la filière fait, le véhicule électrique ne sera pas disponible qu'une année. Nous avons donc choisi de faire la somme actualisée de cette valeur sur dix ans. Ceci correspond à la durée de vie estimée minimum pour les batteries (Gerssen-Gondelach and Faaij, 2012). Un véhicule électrique acheté en 2020, serait donc utilisable jusqu'en 2030. Le montant trouvé n'est valable que dans l'hypothèse simplificatrice où les prix des énergies ne varieraient pas sur dix ans.

Les résultats de ces calculs sont donnés dans le tableau 6.4.

	Valeur d'option
Somme des ménages sur une année	de 90 millions à 340 millions €/an
Somme des ménages entre 2020 et 2030 (actualisé en 2020)	de 1 milliard à 3 milliards €

TABLE 6.4 – Somme des valeurs d'option pour la disponibilité du véhicule électrique pour les ménages français entre 2020 et 2030

6.4 Discussion : études de sensibilité, coût et mise en oeuvre du prélèvement

Études de sensibilité

Pour évaluer l'importance du choix des paramètres sur les résultats, nous menons des analyses de sensibilité. Ces analyses portent sur le niveau d'incertitude associé aux prix des énergies, sur le niveau du prix du véhicule et sur le taux d'actualisation.

Plus les prix des énergies sont incertains (variance élevée), plus la valeur d'option augmente. Cet effet est plus important pour le prix du carburant que pour le prix de l'électricité car le véhicule électrique consomme peu d'électricité.

L'effet du prix du véhicule électrique sur la valeur d'option est visible sur la figure 6.2. Dans ce graphique, nous appelons RSD (Relative Standard Deviation) le coefficient de variation de la distribution des prix. Plus la RSD augmente plus l'incertitude sur le prix du véhicule est grande. Nous remarquons sur le graphique, que plus le prix est incertain (et quelque soit le prix moyen), plus la valeur d'option est élevée. Ce résultat généralise le résultat de la section suivante qui montrait une valeur d'option plus élevée en présence d'incertitude sur le prix des batteries.

Nous pouvons noter que pour un prix moyen anticipé du véhicule électrique à 20 000€, la valeur d'option est comprise entre 400 et 500€, soit 4 fois plus que les résultats affichés jusqu'ici. Or, il existe d'ores et déjà des véhicules électriques à moins de 20 000 euros (Peugeot iOn, MitsubishiI-MiEV, Citroen C-Zero...). La valeur d'option calculée dans la section précédente est donc probablement sous-estimée.

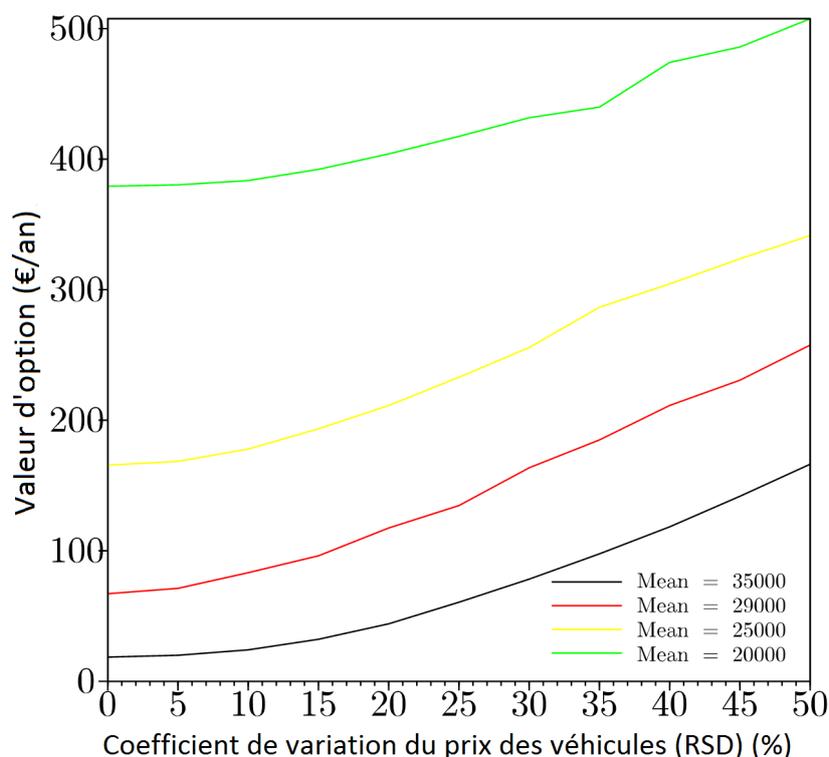


FIGURE 6.2 – Valeur d’option selon différents prix moyens du véhicule électrique et pour différents coefficients de variation de ce prix

Le taux d’actualisation était jusqu’ici de 4% afin de permettre une comparaison avec les études déjà réalisées en France par le ministère. Mais ce niveau de taux d’actualisation est plutôt faible pour décrire des choix privés. Hausman (1979) et Dreyfus and Viscusi (1995) calculent que l’achat de biens durables répond plutôt à des taux d’actualisation allant de 11% à 25%. Nous faisons donc varier le taux d’actualisation. Au-delà de 25%, la valeur d’option devient nulle. Les automobilistes ne valorisent plus suffisamment les économies futures de carburant.

Coût de déploiement de la filière

La question de savoir ce que coûte la disponibilité à large échelle du véhicule électrique est essentielle pour pouvoir comparer la valeur d’option pour la disponibilité aux investissements nécessaires.

La technologie telle que décrite dans l’exercice est aujourd’hui disponible et celle-ci s’améliorera très certainement (voir chapitre 1). L’agrandissement des ca-

capacités de production n'est pas encore d'actualité et son coût est inconnu, notamment concernant la production des batteries. Le coût du déploiement des bornes de recharge et leur entretien a été analysé par plusieurs études. Le rapport Nègre and Legrand (2011), commandé par le ministère de l'environnement, propose par exemple des estimations du prix des bornes selon leur vitesse de recharge ainsi qu'une suggestion sur la répartition entre type de recharge (rapide, lente, privée, publique..).

Le coût composite des bornes serait alors d'environ 400€ par véhicule et par an.

C'est plus que la valeur d'option que les automobilistes accordent à la disponibilité du véhicule électrique telle que calculée dans l'exercice précédent. Cependant ce calcul tient compte du prix actuel des bornes pour de petits volumes. Celui-ci pourraient diminuer avec le temps et le volume mis en place. De plus, l'analyse de sensibilité nous a montré que, pour un véhicule électrique à 20 000€ les automobiliste ont une valeur d'option entre 400 et 500€, ce qui compenserait le déploiement d'infrastructures de recharge.

Prélèvement du montant de la valeur d'option

Une fois ces montants calculés, se pose la question de la récupération de ces valeurs.

La disponibilité du véhicule électrique (pas le véhicule électrique en lui même) est en quelque sorte un bien public. Le principe de non exclusivité définit le fait qu'une fois disponible, tout le monde pourra acheter un véhicule électrique. Le principe de non rivalité est aussi valable : si le déploiement est assez large, tout le monde pourra disposer d'un véhicule électrique sans empêcher les autres de le faire. Il se pose donc la question de la tarification de ce bien public.

En effet, les montants des valeurs d'option représentent le surplus que les automobilistes peuvent payer pour la disponibilité du véhicule électrique à large échelle, nous pourrions donc imaginer un prélèvement de l'Etat pour capter ce surplus. L'Etat redistribuerait ensuite ces montants de manière à investir ou encourager l'investissement dans le déploiement de la filière. Les investissements à fournir, notamment pour l'installation du réseau de recharge, sont en partie du ressort des investissements publics (voir chapitre 1).

Cependant, la mise en place d'un prélèvement non uniforme est difficilement réalisable. Les valeurs d'option des ménages diffèrent selon leurs kilométrages annuels. Certains, qui roulent plus, seront prêts à payer une plus forte valeur d'option alors de nombreux ménages ont une valeur nulle et n'achèteront pas de véhicule électrique dans le futur.

La captation de ces valeurs ne peut pas non plus se faire sur la base de participations volontaires car le processus pourrait faire face à des comportements de passagers clandestins.

Une solution serait de capter cette valeur via un prélèvement dont l'assiette serait liée aux kilométrages annuels, par exemple une taxe portant sur le prix du carburant. Les résultats du modèle utilisé pour l'article nous permettent de calculer que dans le cas où la valeur d'option à capter est 110€, le montant d'une taxe sur le litre de carburant serait de 14 centimes. Mais ce type de prélèvement devra faire face à une réduction de l'assiette sur laquelle elle s'appuie, puisque la hausse du prix du carburant pourrait encourager dès aujourd'hui l'utilisation du véhicule électrique.

Ici nous n'avons pas distingué essence ou diesel dans la taxation, ce qui serait probablement plus judicieux, si l'on considère que ce sont les actuels conducteurs de diesel (qui roulent plus en moyenne) qui seront le plus intéressés par le véhicule électrique.

Il faut aussi souligner que, comme toutes les politiques de long terme, le développement du véhicule électrique qui s'appuierait sur le prélèvement de la valeur d'option, soulève des questions sur l'équité inter-générationnelle. Le développement de la filière du véhicule électrique dès aujourd'hui, fait peser le coût de la disponibilité de ce véhicule sur les utilisateurs actuels mais bénéficiera aux utilisateurs de demain.

Le surplus que les automobilistes seraient disposés à payer, pour avoir l'assurance que le véhicule électrique soit disponible, pourrait aussi être récupéré par les acteurs du secteur privé. En réinvestissant une partie de leurs marges actuelles (équivalente à la valeur d'option) dans le développement de la technologie et le déploiement des infrastructures nécessaires, les acteurs privés pourraient être le vecteur de cette transformation.

6.5 Conclusion

Pour évaluer le bénéfice financier que représenterait la disponibilité du véhicule électrique, nous avons calculé sa valeur d'option. Nous avons tenu compte de l'hétérogénéité des kilométrages annuels des ménages et des incertitudes sur les prix du carburant et de l'électricité. Nous avons pour cela distingué deux mondes, un dans lequel le véhicule électrique est disponible et l'autre non. Dans chacun de ces mondes les agents font face aux prix des énergies et, dans le monde avec véhicule électrique, décident individuellement de l'acheter ou non.

Dans ce chapitre, nous avons calculé que chaque automobiliste a une valeur d'option, pour un véhicule vendu à 29 000€, comprise entre 30 et 110€, selon que l'on tient compte de l'autonomie ou de l'incertitude sur le prix des batteries.

Enfin, pour un véhicule électrique vendu à 20 000€, cette valeur d'option dépasse les 400€.

Ce chapitre nous enseigne aussi que le niveau de valeur d'option dépend positivement du niveau d'incertitude. Plus l'incertitude sur l'avantage conféré par le véhicule électrique est grande, plus la valeur d'option augmente. Cet effet contre intuitif s'explique en partie ainsi : si le véhicule électrique est moins avantageux financièrement que les autres véhicules pour certains ménages, ceux-ci ne l'achèteront pas, leur valeur d'option est alors zéro. Mais inversement, si il y a un avantage financier pour certains ménages, ceux-ci voudront l'acheter et ont une valeur d'option positive, qui augmente avec la possible baisse de prix du véhicule électrique. Le calcul de la valeur d'option tronque les résultats à zéro, celle-ci ne peut pas être négative.

Au delà des estimations de coût nécessaires au développement d'une telle politique, la valeur d'option permet de quantifier ce que les automobilistes pourraient payer pour avoir la possibilité d'acheter et utiliser ce véhicule dans le futur, même si l'avantage qu'ils pourraient en retirer est incertain. Ce montant pourrait alors être investi dans le déploiement de la filière. Ainsi, une valeur d'option à 400€ pourrait, par exemple, couvrir le coût d'installation des bornes estimé pour la France.

La valeur d'option offre une autre façon de considérer la décision d'investissement dans le déploiement de cette technologie. Au lieu de considérer uniquement l'avantage financier qu'apporte le véhicule électrique à un usager moyen dans un univers certain, elle permet de tenir compte de l'ensemble des ménages et des incertitudes sur le prix des énergies. Ce calcul pourrait, par la suite, être encore affiné en tenant compte d'autres caractéristiques qui différencient les ménages (revenus, nombre de véhicules...) ainsi que d'autres sources d'incertitudes (autonomie, fiabilité...).

Conclusion

Cette thèse nous a permis d'apporter des précisions sur l'évaluation du potentiel et du coût de la réduction des émissions de CO₂ dans les transports privés en ville, via le déploiement d'une nouvelle technologie : le véhicule électrique.

L'utilisation du véhicule électrique pour réduire les émissions des transports est régulièrement évoquée, aussi bien dans les objectifs des politiques nationales, qu'à l'échelle locale, notamment dans la planification des transports urbains. Jusqu'à présent, le potentiel des solutions envisagées sur le levier technologique, comme le véhicule électrique, était souvent évalué "hors sol", sans tenir compte des spécificités locales du territoire où elles sont mises en oeuvre et de l'utilisation qui en est faite.

Pour améliorer l'évaluation du potentiel du véhicule électrique, nous avons proposé, à l'aide d'un modèle d'économie urbaine, de tenir compte de l'influence de la forme de la ville. Puis, nous nous sommes intéressés aux interactions de cette technologie avec une autre politique, qui s'appuie sur une modification de la forme urbaine pour réduire les émissions : la ceinture verte. Ensuite l'évaluation du coût du déploiement de cette technologie a été abordée via la notion de valeur d'option, qui permet de calculer l'investissement que les usagers peuvent faire pour rendre cette technologie disponible en tenant compte de l'incertitude future et de l'hétérogénéité des usages des véhicules.

Nous avons alors obtenus les résultats suivants.

Tout d'abord la disponibilité du véhicule électrique à large échelle dans une ville n'aura pas les mêmes effets sur les émissions selon le type de ville. Autrement dit, avec le même nombre de véhicules électriques, les réductions d'émissions ne seront pas identiques pour des villes de formes différentes. Elles ne seront pas identiques non plus dans les différentes localités de la ville.

Si on admet que le choix d'une technologie de véhicule privé (à disponibilité équivalente) est principalement conditionné par le coût de possession, c'est dans les villes étalées, où les distances parcourues sont suffisamment grandes, que le véhicule électrique aura le plus fort potentiel de réduction des émissions. C'est aussi en périphérie des villes que le véhicule électrique aura le plus fort potentiel de réduction.

Ce résultat nous permet de mieux cibler les villes et les localités où le véhicule électrique devrait être déployé en priorité.

Cependant, le fait que le véhicule électrique ait un plus fort potentiel de réduction des émissions dans les grandes villes étalées est en partie conditionné à la possibilité pour ces villes de s'étendre encore. Ainsi, le véhicule électrique permet de diminuer l'impact de l'étalement urbain sur les émissions liées au transport.

De nombreuses analyses associent l'étalement urbain à des effets néfastes pour l'environnement et la santé. Des politiques de restriction à l'étalement urbain sont souvent évoquées pour lutter contre ces effets. Nous avons donc voulu connaître les potentielles interactions de ces politiques avec l'introduction du véhicule électrique.

Nous avons montré que l'évaluation du potentiel de réduction offert par le déploiement du véhicule électrique, dépend de la présence d'autres politiques. Elle dépend notamment des politiques, comme la ceinture verte, qui s'appuient sur un levier de réduction différent (réduction des distances parcourues).

Ainsi, l'association du déploiement du véhicule électrique et d'une restriction à l'étalement urbain est sous-additive et peut même, pour certains niveaux de déploiement du véhicule électrique, amener plus d'émissions que ce déploiement seul. Nous avons aussi pu constater que cette évaluation varie selon la ville étudiée.

Pour considérer le potentiel de réductions d'émissions de plusieurs politiques simultanées en ville, il semble donc nécessaire de tenir compte des interactions que peuvent avoir les leviers sur lesquels celles-ci agissent, mais aussi du type de ville où elles sont mises en oeuvre.

Enfin, nous avons vu que la valeur d'option offre une autre façon de considérer la décision d'investissement dans le déploiement de cette technologie. Au delà des estimations de coût nécessaires au développement d'une telle politique, la valeur d'option permet de quantifier ce que les automobilistes pourraient payer pour avoir la possibilité d'acheter et utiliser ce véhicule dans le futur, même si l'avantage qu'ils pourraient en retirer est incertain.

Nous avons calculé que chaque automobiliste a une valeur d'option, pour un véhicule vendu à 29 000€, comprise entre 30 et 110€, selon que l'on tient compte de l'autonomie ou de l'incertitude sur le prix des batteries. Enfin, pour un véhicule électrique vendu à 20 000€, cette valeur d'option dépasse les 400€. Ce dernier montant pourrait, par exemple, couvrir le coût d'installation des bornes estimé pour la France.

Le chapitre consacré à la valeur d'option nous enseigne par ailleurs que le niveau de la valeur d'option dépend positivement du niveau d'incertitude. Plus l'incertitude sur le prix du véhicule électrique est grande, plus la valeur d'option augmente. Cet effet contre intuitif s'explique en partie ainsi : si le véhicule électrique n'apporte pas d'avantage financier à certains ménages, ceux-ci ne l'achète-

ront pas, leur valeur d'option est alors toujours nulle. Si, au contraire, le véhicule électrique confère un avantage financier à certains ménages par rapport aux autres véhicules, ceux-ci voudront l'acheter et leur valeur d'option est alors positive et augmente avec la possibilité d'une baisse du prix du véhicule électrique. Le calcul de la valeur d'option tronque les résultats à zéro, celle-ci ne peut pas être négative.

Cette thèse est avant tout un exercice de modélisation permettant d'approcher les potentielles interactions entre la forme de ville et des politiques jouant sur des leviers différents pour réduire les émissions de CO₂ en ville, ainsi que la valeur d'option associée à cette technologie. En tant que tel, elle s'appuie sur de nombreuses hypothèses (choix de modélisation, choix de paramètres), parfois par besoin de simplification, parfois comme parti pris. Ces hypothèses sont toutes discutables, cependant elles nous permettent de raconter une histoire plausible et cohérente, et de comprendre les mécanismes à l'oeuvre dans ce futur possible.

Ainsi, par exemple, le choix de caractériser la forme urbaine par son profil de densité et le nombre de centres d'emplois est une hypothèse restrictive. D'autres caractéristiques, qui ne sont pas prises en compte ici, pourraient jouer un rôle dans l'adoption et l'efficacité du véhicule électrique. Par exemple, la disponibilité des emplacements de stationnement est importante pour la disponibilité de la recharge. Ou encore, l'importance du dénivelé d'une ville (et donc des trajets) diminue fortement l'autonomie du véhicule électrique et limite son utilisation.

Le choix du véhicule ne détaille pas les déterminants, autres que le coût, dans cette décision. Notamment, ce choix ne tient pas compte du revenu et du nombre de véhicules du ménage, qui sont supposés constants. La prise en compte de ces aspects renforcerait probablement l'utilisation du véhicule électrique dans les zones urbaines habitées par les ménages aisés, ayant en moyenne plus de véhicules, et donc la possibilité d'avoir un véhicule dédié aux déplacements longues distances.

De plus, le déploiement d'une technologie du véhicule électrique disponible à large échelle, actionné par une ou des politiques n'est pas explicitement détaillé.

Certains aspects n'ont pas été abordés dans cette thèse, comme le chemin parcouru pour obtenir cette disponibilité à large échelle. En effet cette thèse s'appuie sur une modélisation statique. La dynamique de mise en place des conditions nécessaires à l'arrivée de cette technologie comme mode de transport de masse n'est pas détaillée.

Nous avons en quelques sortes commencé l'histoire par la fin. Notre travail nous a permis d'éclairer quels seraient le potentiel d'émissions évitées et les montants qui pourraient être investis dès aujourd'hui ; il faudrait maintenant étudier les trajectoires pour parvenir à cette situation. De même, les coûts associés à la disponibilité du véhicule ne sont pas explicités. Ces coûts dépendent en partie de la dynamique de mise en place de cette disponibilité.

Aux vues des résultats trouvés dans le cadre d'une analyse statique, il nous semble cohérent d'imaginer que les résultats d'une analyse dynamique pourraient aussi dépendre des spécificités locales. Les trajectoires permettant la réduction d'émissions via le déploiement du véhicule électrique et leurs financements, devraient alors varier selon les formes urbaines et les autres politiques déployées.

La mobilité électrique est aujourd'hui envisagée comme une alternative pertinente aux véhicules thermiques. Actuellement, plusieurs pays s'engagent à interdire progressivement la vente de véhicules thermiques, en 2025 pour l'Autriche et l'Inde, en 2030 pour l'Allemagne, en 2040 pour la France et le Royaume-Uni et la Chine. Cette mesure vise à forcer les ménages à utiliser une technologie moins polluante qui, pour une partie d'entre eux, offre aussi un avantage financier à l'utilisation.

Nos résultats permettent d'orienter ces décisions, en encourageant à différencier les territoires sur lesquelles elles s'appliquent. Ainsi, l'introduction du véhicule électrique devrait être envisagée en priorité dans les localités où les ménages parcourent beaucoup de kilomètres (zone péri-urbaines des grandes villes).

De plus, la présence d'autres politiques s'appuyant sur la réduction du volume de mobilité et la modification des habitudes de déplacements sont à prendre en compte dans l'évaluation du potentiel de réduction d'émissions qu'apporte la mobilité électrique. Ainsi, les restrictions à l'étalement urbain, qui sont mises en oeuvre dans de nombreuses localités, pourraient diminuer l'efficacité du véhicule électrique pour réduire les émissions.

Enfin, si les automobilistes sont, en moyenne, prêts à payer une valeur d'option pour la disponibilité du véhicule électrique, certains d'entre eux (ceux qui roulent peu) n'auront individuellement pas d'intérêt financier à utiliser ce véhicule. L'interdiction d'utiliser le véhicule thermique va donc faire peser un coût supplémentaire sur ces ménages qui n'auraient pas acheté de véhicule électrique autrement. Ainsi, pour que l'interdiction du véhicule thermique soit moins contraignante pour ces ménages, il semble nécessaire d'envisager une réduction du prix du véhicule électrique, via des investissements à faire dès aujourd'hui dans le développement de cette technologie.

Bibliographie

- Allcott, H., 2011. Consumers' perceptions and misperceptions of energy costs. *The American Economic Review* 101 (3), 98–104.
- Allcott, H., Wozny, N., Oct. 2013. Gasoline Prices, Fuel Economy, and the Energy Paradox. *Review of Economics and Statistics* 96 (5), 779–795.
- Alonso, W., 1964. Location and land use. toward a general theory of land rent. *Location and land use. Toward a general theory of land rent.*
- Anas, A., 1982. Residential location markets and urban transportation. *Economic theory, econometrics and policy analysis with discrete choice models.* New York : Academic Press.
- Anas, A., 1983. Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models. *Transportation Research Part B : Methodological* 17 (1), 13–23.
- Anas, A., 1990. Taste heterogeneity and urban spatial structure : the logit model and monocentric theory reconciled. *Journal of Urban Economics* 28 (3), 318–335.
- Anderson, D. L., 2009. An evaluation of current and future costs for lithium-ion batteries for use in electrified vehicle powertrains. Ph.D. thesis, Duke University.
- Anderson, W. P., Kanaroglou, P. S., Miller, E. J., 1996. Urban form, energy and the environment : a review of issues, evidence and policy. *Urban studies* 33 (1), 7–35.
- Arrow, K. J., Fisher, A. C., May 1974. Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility. *The Quarterly Journal of Economics* 88 (2), 312–319.
- Axsen, J., Kurani, K. S., 2013. Hybrid, plug-in hybrid, or electric : What do car buyers want ? *Energy Policy* 61, 532 – 543.

- Axsen, J., Mountain, D. C., Jaccard, M., 2009. Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect : The case of hybrid-electric vehicles. *Resource and Energy Economics* 31 (3), 221–238.
- Baltas, G., Saridakis, C., 2013. An empirical investigation of the impact of behavioural and psychographic consumer characteristics on car preferences : An integrated model of car type choice. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 54 (0), 92 – 110.
- Banister, D., 2008. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy* 15 (2), 73 – 80.
- Banister, D., 2011. Cities, mobility and climate change. *Journal of Transport Geography* 19 (6), 1538–1546.
- Barter, P., 2000. Urban transport in Asia : Problems and prospects for high-density cities. *Asia-Pacific Development Monitor* 2 (1), 33–66.
- Becker, U. J., Becker, T., Gerlach, J., 2012. The true costs of automobility : External costs of cars overview on existing estimates in eu-27. TU Dresden.
- Bento, A., Kaffine, D., Roth, K., Zaragoza-Watkins, M., 2014. The effects of regulation in the presence of multiple unpriced externalities : Evidence from the transportation sector. *American Economic Journal : Economic Policy* 6 (3), 1–29.
- Bento, A. M., Cropper, M., Mobarak, A. M., Vinha, K., 2003. The impact of urban spatial structure on travel demand in the united states. World Bank policy research working paper (3007).
- Bento, A. M., Li, S., Roth, K., 2012. Is there an energy paradox in fuel economy ? a note on the role of consumer heterogeneity and sorting bias. *Economics Letters* 115 (1), 44 – 48.
- Bento, A. M., Roth, K. D., Wang, Y., et al., 2015. The impact of cafe standards on innovation in the us automobile industry. In : 2015 AAEA & WAEA Joint Annual Meeting, July 26-28, San Francisco, California. No. 206195. Agricultural and Applied Economics Association & Western Agricultural Economics Association.
- Bertaud, A., 2001. Metropolis : A measure of the spatial organization of 7 large cities. Unpublished Working Paper.
- Bertaud, A., 2002a. Note on transportation and urban spatial structure. In : ABCDE Conference, Washington DC, April.

- Bertaud, A., 2002b. The spatial organization of cities : Deliberate outcome or unforeseen consequence ?
- Bertaud, A., Nov. 2003. Clearing the air in Atlanta : transit and smart growth or conventional economics ? *Journal of Urban Economics* 54 (3), 379–400.
- Bøhringer, C., Koschel, H., Moslener, U., 2008. Efficiency losses from overlapping regulation of eu carbon emissions. *Journal of regulatory economics* 33 (3), 299–317.
- Bosetti, V., Longden, T., 2013. Light duty vehicle transportation and global climate policy : The importance of electric drive vehicles. *Energy Policy* 58, 209 – 219.
- Brady, J., O’Mahony, M., 2011. Travel to work in dublin. the potential impacts of electric vehicles on climate change and urban air quality. *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 16 (2), 188–193.
- Breheny, M., 1997. Urban compaction : feasible and acceptable ? *Cities* 14 (4), 209–217.
- Bunch, D. S., Bradley, M., Golob, T. F., Kitamura, R., Occhiuzzo, G. P., 1993. Demand for clean-fuel vehicles in california : A discrete-choice stated preference pilot project. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 27 (3), 237 – 253, special Issue Energy and Global Climate Change.
- Bunch, D. S., Ramea, K., Yeh, S., Yang, C., 2015. Incorporating Behavioral Effects from Vehicle Choice Models into Bottom-Up Energy Sector Models.
- Burke, A., 2010. Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. *International Journal of Energy Research* 34 (2), 133–151.
- Cambridge Econometrics, Ricardo-AEA, 2013. An economic assessment of low carbon vehicles.
- Carruthers, J. I., Ulfarsson, G. F., 2003. Urban sprawl and the cost of public services. *Environment and Planning B* 30 (4), 503–522.
- Catenacci, M., Verdolini, E., Bosetti, V., Fiorese, G., Oct. 2013. Going electric : Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy* 61, 403–413.
- CEREMA, Jan. 2016. Bornes de recharge pour véhicules électriques - réglementation et préconisations de mise en oeuvre sur la voie publique.

- Cervero, R., 1998. *The transit metropolis : a global inquiry*. Island press.
- Cervero, R., Kockelman, K., 1997. Travel demand and the 3ds : density, diversity, and design. *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 2 (3), 199–219.
- CGDD, May 2011. *Les véhicules électriques en perspectives, Analyse coûts-avantages et demande potentielle*.
- Chan, B. C., 2007. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE* 95 (4), 704–718.
- Chapman, L., Sep. 2007. Transport and climate change : a review. *Journal of Transport Geography* 15 (5), 354–367.
- Choo, S., Mokhtarian, P. L., 2004. What type of vehicle do people drive ? the role of attitude and lifestyle in influencing vehicle type choice. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 38 (3), 201 – 222.
- Cicchetti, C. J., Freeman III, A. M., 1971. Option demand and consumer surplus : Further comment. *The Quarterly Journal of Economics* 85 (3), 528–539.
- Clark, C., 1951. Urban population densities. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* 114 (4), 490–496.
- Conseil constitutionnel, 2001. *Le principe d'égalité*.
- Cowan, R., Hultén, S., 1996. Escaping lock-in : the case of the electric vehicle. *Technological forecasting and social change* 53 (1), 61–79.
- Creutzig, F., 2014. How fuel prices determine public transport infrastructure, modal shares and urban form. *Urban Climate* 10, 63–76.
- Creutzig, F., Baiocchi, G., Bierkandt, R., Pichler, P.-P., Seto, K. C., 2015. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (20), 6283–6288.
- Creutzig, F., McGlynn, E., Minx, J., Edenhofer, O., 2011. Climate policies for road transport revisited (i) : Evaluation of the current framework. *Energy Policy* 39 (5), 2396–2406.
- Creutzig, F., Mühlhoff, R., Römer, J., 2012. Decarbonizing urban transport in european cities : four cases show possibly high co-benefits. *Environmental Research Letters* 7 (4), 44–42.

- Crist, P., 2012. Electric vehicles revisited : costs, subsidies and prospects. International Transport Forum Discussion Paper.
- Curtis, C., Renne, J. L., Bertolini, L., 2009. Transit oriented development : making it happen. Ashgate Publishing, Ltd.
- Daly, H. E., Ramea, K., Chiodi, A., Yeh, S., Gargiulo, M., Gallachóir, B. Ó., 2014. Incorporating travel behaviour and travel time into times energy system models. Applied Energy 135, 429–439.
- Dargay, J., Gately, D., Sommer, M., 2007. Vehicle ownership and income growth, worldwide : 1960-2030. The Energy Journal, 143–170.
- De la Barra, T., Rickaby, P., 1982. Modelling regional energy use : a land use, transport and energy evaluation model. Environment and Planning B 9 (4), 429–443.
- De Palma, A., Lefevre, C., 1985. Residential change and economic choice behavior. Regional Science and Urban Economics 15 (3), 421–434.
- De Palma, A., Picard, N., Motamedi, K., 2014. Application of urbansim in paris (ile-de-france) case study Working paper or preprint.
- D’Haultfoeuille, X., Givord, P., Boutin, X., 2014. The environmental effect of green taxation : the case of the french bonus/malus. The Economic Journal 124 (578), 444–480.
- Dixit, A. K., Pindyck, R. S., Jan. 1994. Investment under uncertainty. Princeton University Press.
- Dodman, D., 2009. Blaming cities for climate change ? an analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. Environment and Urbanization 21 (1), 185–201.
- Doucette, R. T., McCulloch, M. D., 2011. Modeling the CO2 emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. Energy Policy 39 (2), 803–811.
- Dreyfus, M. K., Viscusi, W. K., 1995. Rates of time preference and consumer valuations of automobile safety and fuel efficiency. Journal of Law and Economics 38 (1), pp. 79–105.
- Duarte, F., Ultramari, C., 2011. Making public transport and housing match : Accomplishments and failures of curitiba’s brt. Journal of Urban Planning and Development 138 (2), 183–194.

- Dubin, R. A., Sung, C.-H., et al., 1987. Spatial variation in the price of housing : rent gradients in non-monocentric cities. *Urban Studies* 24 (3), 193–204.
- Echenique, M., Williams, I., 1980. Developing theoretically based urban models for practical planning studies. *Sistemi Urbani* 1, 13–23.
- EIA, 2009. *Transport, Energy and CO2 : Moving towards Sustainability*.
- EIA, 2013. *Annual Energy Outlook 2013*.
- Energy Information Agency, 2013. *Global EV Outlook 2013*.
- Energy Information Agency, 2015. *Global EV Outlook 2015 Update*.
- ENTD, 2008. *Enquete nationale transport et déplacements*.
- Espey, M., Nair, S., 2005. Automobile fuel economy : What is it worth ? *Contemporary Economic Policy* 23 (3), 317–323.
- European Environment Agency (Ed.), 2010. *Towards a resource-efficient transport system*. No. 2. Office for Official Publ. of the European Union, Luxembourg.
- Ewing, G., Sarigöllü, E., 2000. Assessing consumer preferences for clean-fuel vehicles : A discrete choice experiment. *Journal of Public Policy & Marketing* 19 (1), 106–118.
- Ewing, G. O., Sarigöllü, E., 1998. Car fuel-type choice under travel demand management and economic incentives. *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 3 (6), 429 – 444.
- Ewing, R., Cervero, R., 2001. *Travel and the built environment : a synthesis*. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* (1780), 87–114.
- Ewing, R., Cervero, R., 2010. *Travel and the built environment : a meta-analysis*. *Journal of the American Planning Association* 76 (3), 265–294.
- Ewing, R., Pendall, R., Chen, D., 2003. Measuring sprawl and its transportation impacts. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* (1831), 175–183.
- Ewing, R., Schmid, T., Killingsworth, R., Zlot, A., Raudenbush, S., 2008. Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity. *Urban Ecology*, 567–582.

- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., Hawthorne, P., 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319 (5867), 1235–1238.
- Figuroa, M. J., Ribeiro, S. K., 2013. Energy for road passenger transport and sustainable development : assessing policies and goals interactions. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5 (2), 152–162.
- Frank, L. D., Pivo, G., 1994. Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel : single-occupant vehicle, transit, and walking. *Transportation research record*, 44–52.
- Franke, T., Neumann, I., Buhler, F., Cocron, P., Krems, J. F., 2012. Experiencing range in an electric vehicle : Understanding psychological barriers. *Applied Psychology* 61 (3), 368–391.
- Fujita, M., 1989. *Urban economic theory : land use and city size*. Cambridge university press.
- Gaigné, C., Riou, S., Thisse, J.-F., 2012. Are compact cities environmentally friendly ? *Journal of Urban Economics* 72 (2), 123–136.
- Gallagher, K. S., Muehlegger, E., 2011. Giving green to get green ? incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology. *Journal of Environmental Economics and Management* 61 (1), 1–15.
- Gardner, B., Abraham, C., 2008. Psychological correlates of car use : A meta-analysis. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour* 11 (4), 300 – 311.
- Gately, D., Huntington, H. G., 2002. The asymmetric effects of changes in price and income on energy and oil demand. *The Energy Journal*, 19–55.
- Gerssen-Gondelach, S. J., Faaij, A. P., 2012. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources* 221, 111–129.
- Gillingham, K., 2013. *The economics of fuel economy standards versus feebates*. National Energy Policy Institute.
- Gillingham, K., Jenn, A., Azevedo, I. M., 2015. Heterogeneity in the response to gasoline prices : Evidence from pennsylvania and implications for the rebound effect. *Energy Economics* 52, 41–52.
- Glaeser, E. L., Gyourko, J., Saks, R. E., 2006. Urban growth and housing supply. *Journal of Economic Geography* 6 (1), 71–89.

- Glaeser, E. L., Kahn, M. E., 2004. Sprawl and urban growth. *Handbook of regional and urban economics* 4, 2481–2527.
- Glaeser, E. L., Kahn, M. E., 2010. The greenness of cities : carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of urban economics* 67 (3), 404–418.
- Goodwin, P., 2012. Peak travel, peak car and the future of mobility : Evidence, unresolved issues, and policy implications, and a research agenda. *International Transport Forum Discussion Papers*.
- Gordon, P., Richardson, H. W., 1997. Are compact cities a desirable planning goal ? *Journal of the American planning association* 63 (1), 95–106.
- Graham-Rowe, E., Skippon, S., Gardner, B., Abraham, C., 2011. Can we reduce car use and, if so, how ? a review of available evidence. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 45 (5), 401 – 418.
- Granovskii, M., Dincer, I., Rosen, M. A., 2006. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources* 159 (2), 1186–1193.
- Greene, D. L., 1989. Motor fuel choice : An econometric analysis. *Transportation Research Part A : General* 23 (3), 243 – 253, special Issue Alternative Fuels.
- Greene, D. L., 1990. Cafe or price ? : An analysis of the effects of federal fuel economy regulations and gasoline price on new car mpg, 1978-89. *The Energy Journal* 11 (3), pp. 37–57.
- Greene, D. L., 2010. How consumers value fuel economy : A literature review.
- Greene, D. L., Patterson, P. D., Singh, M., Li, J., 2005. Feebates, rebates and gas-guzzler taxes : a study of incentives for increased fuel economy. *Energy policy* 33 (6), 757–775.
- Greene, D. L., Plotkin, S., 2011. Reducing greenhouse gas emission from us transportation.
- Greening, L. A., Greene, D. L., Difiglio, C., 2000. Energy efficiency and consumption , the rebound effect ,a survey. *Energy policy* 28 (6), 389–401.
- Grimes-Casey, H. G., Keoleian, G. A., Willcox, B., 2008. Carbon emission targets for driving sustainable mobility with us light-duty vehicles. *Environmental Science & Technology* 43 (3), 585–590.

- Grübler, A., Nakićenović, N., Victor, D. G., 1999. Dynamics of energy technologies and global change. *Energy policy* 27 (5), 247–280.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V., 2009. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (6), 1513–1522.
- Hanemann, W., Jan. 1989. Information and the concept of option value. *Journal of Environmental Economics and Management* 16 (1), 23–37.
- Hausman, J. A., Apr. 1979. Individual discount rates and the purchase and utilization of Energy-Using durables. *The Bell Journal of Economics* 10 (1), 33–54.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H., 2013. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology* 17 (1), 53–64.
- Heikkila, E., Gordon, P., Kim, J. I., Peiser, R. B., Richardson, H. W., Dale-Johnson, D., 1989. What happened to the cbd-distance gradient ? : land values in a policentric city. *Environment and Planning A* 21 (2), 221–232.
- Henry, C., Dec. 1974. Investment decisions under uncertainty : The "Irreversibility effect". *The American Economic Review* 64 (6), 1006–1012.
- Hoornweg, D., Sugar, L., Gomez, C. L. T., 2011. Cities and greenhouse gas emissions : moving forward. *Environment and Urbanization*, 207–227.
- Horne, M., Jaccard, M., Tiedemann, K., 2005. Improving behavioral realism in hybrid energy-economy models using discrete choice studies of personal transportation decisions. *Energy Economics* 27 (1), 59–77.
- Hoyt, H., 1954. Homer hoyt on development of economic base concept. *Land Economics*, 182–186.
- Hughes, J. E., Knittel, C. R., Sperling, D., 2008. Evidence of a shift in the short-run price elasticity of gasoline demand. *The Energy Journal*, 113–134.
- IEA, 2011. Technology roadmap : Electric and plug-in hybrid electric vehicles.
- IEA, 2012. EV city case book.
- IPCC, Seto, K., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J., Müller, D., Murakami, J., Nagendra, H., Ramaswami, A., 2014a. 2014 : Human settlements, infrastructure and spatial planning. in : *Climate change 2014 : Mitigation of climate*

- change. contribution of working group iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (edenhofer, o., r. pichs-madruga, y. sokona, e. farahani, s. kadner, k. seyboth, a. adler, i. baum, s. brunner, p. eickemeier, b. kriemann, j. savolainen, s. schlömer, c. von stechow, t. zwickel and j.c. minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Nunez, X., DAgosto, M., Dimitriu, D., Figueroa Meza, M., Fulton, L., Kobayashi, S., Lah, O., McKinnon, A., Newman, P., Ouyang, M., Schauer, J., Sperling, D., Tiwari, G., 2014b. 2014 : Transport. in : Climate change 2014 : Mitigation of climate change. contribution of working group iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (edenhofer, o., r. pichs-madruga, y. sokona, e. farahani, s. kadner, k. seyboth, a. adler, i. baum, s. brunner, p. eickemeier, b. kriemann, j. savolainen, s. schlömer, c. von stechow, t. zwickel and j.c. minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jabareen, Y. R., 2006. Sustainable urban forms their typologies, models, and concepts. *Journal of planning education and research* 26 (1), 38–52.
- Jaffe, A. B., Stavins, R. N., 1994. The energy paradox and the diffusion of conservation technology. *Resource and Energy Economics* 16 (2), 91–122.
- Klier, T., Linn, J., 2013. Fuel prices and new vehicle fuel economy : Comparing the united states and western europe. *Journal of Environmental Economics and management* 66 (2), 280–300.
- Knudson, W. A., 2009. The environment, energy, and the tinbergen rule. *Bulletin of Science, Technology & Society* 29 (4), 308–312.
- Kromer, M. A., 2007. Electric powertrains : opportunities and challenges in the us light-duty vehicle fleet. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Lave, C. A., Train, K., 1979. A disaggregate model of auto-type choice. *Transportation research part A : general* 13 (1), 1–9.
- Lave, L., MacLean, H., Hendrickson, C., Lankey, R., 2000. Life-cycle analysis of alternative automobile fuel/propulsion technologies. *Environmental Science & Technology* 34 (17), 3598–3605.
- Le Néchet, F., 2011. Consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la configuration des densités dans 34 villes européennes. *Cybergeo : European Journal of Geography*.

- Lebegue, 2005. Révision du taux d'actualisation des investissements publics. Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebegue.
- Lecuyer, O., Quirion, P., 2013. Can uncertainty justify overlapping policy instruments to mitigate emissions ? *Ecological Economics* 93, 177–191.
- Lehmann, P., 2012. Justifying a policy mix for pollution control : a review of economic literature. *Journal of Economic Surveys* 26 (1), 71–97.
- Leinert, S., Daly, H., Hyde, B., Gallachóir, B. Ó., 2013. Co-benefits ? not always : Quantifying the negative effect of a co 2-reducing car taxation policy on nox emissions. *Energy Policy* 63, 1151–1159.
- Lieven, T., Muhlmeier, S., Henkel, S., Waller, J. F., 2011. Who will buy electric cars ? an empirical study in germany. *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 16 (3), 236–243.
- Lin, Z., Greene, D., 2010. Who will more likely buy phev : a detailed market segmentation analysis. The 25th World Battery, hybrid and fuel cell electric vehicle symposium & exhibition, Shenzhen, China.
- Lin, Z., Greene, D., 2011. Promoting the market for plug-in hybrid and battery electric vehicles : role of recharge availability. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* (2252), 49–56.
- Linn, J., 2014. Explaining the adoption of diesel fuel passenger cars in europe. *Resources for the Future Discussion Paper* (14-08).
- Lovins, A. B., 2005. More profit with less carbon. *Scientific American* 293 (3), 74–83.
- Lowry, I. S., 1964. A model of metropolis. Rand Corporation, Santa Monica, CA.
- MacLean, H. L., Lave, L. B., 2003. Life cycle assessment of automobile/fuel options. *Environmental science & technology* 37 (23), 5445–5452.
- Marchetti, C., 1994. Anthropological invariants in travel behavior. *Technological forecasting and social change* 47 (1), 75–88.
- Markel, T., Simpson, A., 2006. Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology. Vol. 1.
- Masson, S., 2000. Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation. Ph.D. thesis, Lyon 2.

- McCollum, D., Krey, V., Kolp, P., Nagai, Y., Riahi, K., 2014. Transport electrification : A key element for energy system transformation and climate stabilization. *Climatic change* 123 (3-4), 651–664.
- McCollum, D., Yang, C., 2009. Achieving deep reductions in us transport greenhouse gas emissions : Scenario analysis and policy implications. *Energy Policy* 37 (12), 5580–5596.
- McCollum, D. L., Wilson, C., Pettifor, H., Ramea, K., Krey, V., Riahi, K., Bertram, C., Lin, Z., Edelenbosch, O. Y., Fujisawa, S., 2016. Improving the behavioral realism of global integrated assessment models : An application to consumers' vehicle choices. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*.
- McFadden, D., 2000. Disaggregate behavioral travel demand's rum side. *Travel Behaviour Research*, 17–63.
- McFadden, D., et al., 1973. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. Ch. 4.
- McFadden, D., et al., 1984. Econometric analysis of qualitative response models. *Handbook of econometrics* 2, 1395–1457.
- McKinsey and Company, 2010. A portofolio of power-trains for Europe : a fact-based analysis.
- Metz, D., 2010. Saturation of demand for daily travel. *Transport Reviews* 30 (5), 659–674.
- Millard-Ball, A., Schipper, L., 2011. Are we reaching peak travel ? trends in passenger transport in eight industrialized countries. *Transport Reviews* 31 (3), 357–378.
- Mills, E. S., 1967. An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. *The American Economic Review*, 197–210.
- Moser, G., Bamberg, S., 2008. The effectiveness of soft transport policy measures : A critical assessment and meta-analysis of empirical evidence. *Journal of Environmental Psychology* 28 (1), 10 – 26.
- Mousseau, B., Fulda, A.-S., Emberger, G., 2012. Modelling impacts of local policies to optimise the development of electric vehicles. Technische Universitat Munchen.

- Mumford, L., 1961. *The city in history : Its origins, its transformations, and its prospects*. Harcourt, Brace & World New York.
- Murray, A. T., Wu, X., 2003. Accessibility tradeoffs in public transit planning. *Journal of Geographical Systems* 5 (1), 93–107.
- Muth, R. F., 1969. *Cities and housing ; the spatial pattern of urban residential land use*.
- Nègre, L., Legrand, J.-L., 2011. *Livre vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules «décarbonés»*. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.
- Newman, P., Kenworthy, J., 1999. *Sustainability and cities : overcoming automobile dependence*. Island Press.
- Newman, P., Kenworthy, J., 2006. *Urban design to reduce automobile dependence*. *Opolis* 2 (1).
- Newman, P., Kenworthy, J., 2011a. Evaluating the transport sector's contribution to greenhouse gas emissions and energy consumption. *Technologies for climate change mitigation : transport sector*, UNEP Risoe Centre.
- Newman, P., Kenworthy, J., 2011b. Peak car use : Understanding the demise of automobile dependence. *World Transport Policy and Practice* 17 (2), 31–42.
- Newman, P. G., Kenworthy, J. R., 1989. *Cities and automobile dependence : an international sourcebook*.
- Newman, P. W., Kenworthy, J. R., 1996. The land use transport connection : An overview. *Land Use Policy* 13 (1), 1 – 22.
- Norman, J., MacLean, H. L., Kennedy, C. A., 2006. Comparing high and low residential density : life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *Journal of urban planning and development* 132 (1), 10–21.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., Althaus, H.-J., 2010. Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental science & technology* 44 (17), 6550–6556.
- Observatoire de l'énergie, 2007. *Les chiffres clefs : CO2 et énergie - france et monde*.
- Oikonomou, V., Jepma, C. J., 2008. A framework on interactions of climate and energy policy instruments. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13 (2), 131–156.

- Palma, A. d., Thisse, J.-F., 1989. Les modeles de choix discrets. *Annales d'Economie et de Statistique* (14), pp. 151–190.
- Pasaoglu, G., Zubaryeva, A., Fiorello, D., Thiel, C., 2014. Analysis of european mobility surveys and their potential to support studies on the impact of electric vehicles on energy and infrastructure needs in europe. *Technological Forecasting and Social Change* 87 (0), 41 – 50.
- Propfe, B., Redelbach, M., Santini, D. J., Friedrich, H., May 2012. Cost analysis of plug-in hybrid electric vehicles including maintenance & repair costs and resale values. In : *EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*.
- Prud'homme, R., Koning, M., 2012. Electric vehicles : A tentative economic and environmental evaluation. *Transport Policy* 23 (0), 60 – 69.
- Pushkarev, B., Zupan, J., 1980. *Urban rail in America : An exploration of criteria for fixed-guideway transit*.
- Quigley, J. M., Raphael, S., 2005. Regulation and the high cost of housing in california. *The American Economic Review* 95 (2), pp. 323–328.
- Quinet, A., Baumstark, L., Célestin-Urbain, J., Pouliquen, H., Auverlot, D., Raynard, C., 2009. *La valeur tutélaire du carbone*.
- Richardson, H. W., 1977. On the possibility of positive rent gradients. *Journal of Urban Economics* 4 (1), 60–68.
- Rickwood, P., Glazebrook, G., Searle, G., Mar. 2008. Urban structure and energy : A review. *Urban Policy and Research* 26 (1), 57–81.
- Satterthwaite, D., 2008. Cities' contribution to global warming : notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization* 20 (2), 539–549.
- Saujot, M., 2013. *Analyse économique et simulation prospective dans la planification de la ville sobre en carbone : Application á grenoble du modele tranus+*. Ph.D. thesis, ENMP.
- Schafer, A., 2000. Regularities in travel demand : an international perspective. *Journal of transportation and Statistics* 3 (3), 1–31.
- Schafer, A., 2012. *Introducing behavioral change in transportation into energy/economy/environment models*. World Bank Policy Research Working Paper (6234).

- Schafer, A., Victor, D. G., 2000. The future mobility of the world population. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 34 (3), 171–205.
- Schafer, A. W., Jul. 2015. Long-term trends in domestic US passenger travel : the past 110 years and the next 90. *Transportation* (44).
- Schipper, L., Marie-Lilliu, C., Fulton, L., 2002. Diesels in europe : analysis of characteristics, usage patterns, energy savings and co2 emission implications. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)* 36 (2), 305–340.
- Schipper, L., Marie-Lilliu, C., Gorham, R., 2000. Flexing the link between transport and greenhouse gas emissions—a path for the world bank. International Energy Agency.
- Schmalensee, R., Dec. 1972. Option demand and consumer's surplus : Valuing price changes under uncertainty. *The American Economic Review* 62 (5), 813–824.
- Schneider, A., Mertes, C. M., Tatem, A. J., Tan, B., Sulla-Menashe, D., Graves, S. J., Patel, N. N., Horton, J. A., Gaughan, A. E., Rollo, J. T., Schelly, I. H., Stevens, F. R., Dastur, A., Mar. 2015. A new urban landscape in east southeast asia, 2000 2010. *Environmental Research Letters* 10 (3), 034002.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T.-H., 2008. Use of us croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science* 319 (5867), 1238–1240.
- Seto, K. C., Güneralp, B., Hutyrá, L. R., 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (40), 16083–16088.
- Simon, H. A., 1957. *Models of man ; social and rational*.
- Small, K. A., Van Dender, K., 2007. Fuel efficiency and motor vehicle travel : the declining rebound effect. *The Energy Journal*, 25–51.
- Spielvogel, G., 2004. Surplus agricole, division du travail et emergence des villes. un modele spatial d'équilibre general. *Revue d'économie regionale et urbaine* (5), 869–882.
- Struben, J., Serman, J. D., 2008. Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. *Environment and Planning B : Planning and Design* 35 (6), 1070–1097.

- Tamayao, M.-A. M., Michalek, J. J., Hendrickson, C., Azevedo, I. M., 2015. Regional variability and uncertainty of electric vehicle life cycle co2 emissions across the united states. *Environmental Science & Technology* 49 (14), 8844–8855.
- Thiel, C., Perujo, A., Mercier, A., Nov. 2010. Cost and CO2 aspects of future vehicle options in europe under new energy policy scenarios. *Energy Policy* 38 (11), 7142–7151.
- Thisse, J.-F., Billot, A., 1995. Modèles de choix individuels discrets : théorie et applications à la micro-économie. *Revue économique* 46 (3), 921–931.
- Thurstone, L. L., 1927. A law of comparative judgment. *Psychological review* 34 (4), 273.
- Tinbergen, J., 1952. On the theory of economic policy.
- Traeger, C., 2013. What's the Option ? CUDARE Working Papers.
- Tran, M., Banister, D., Bishop, J. D. K., McCulloch, M. D., May 2012. Realizing the electric-vehicle revolution. *Nature Clim. Change* 2 (5), 328–333.
- Turrentine, T. S., Kurani, K. S., 2007. Car buyers and fuel economy ? *Energy Policy* 35 (2), 1213 – 1223.
- van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., van den Broek, M., Faaij, A., Feb. 2011. Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources* 196 (4), 2298–2310.
- Verboven, F., 2002. Quality-based price discrimination and tax incidence : evidence from gasoline and diesel cars. *RAND Journal of Economics*, 275–297.
- Viguié, V., 2012. Urban dynamics modelling : application to economics assessment of climate change. Ph.D. thesis, Université Paris-Est.
- Viguié, V., Hallegatte, S., 2012. Trade-offs and synergies in urban climate policies. *Nature Climate Change* 2 (5), 334–337.
- Viguié, V., Hallegatte, S., Rozenberg, J., 2014. Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale : A case study on paris. *Technological Forecasting and Social Change* 87, 305 – 324.
- Von Thünen, J. H., Schumacher-Zarchlin, H., 1875. Der isolirte staat in beziehung auf landwirtschaft und nationalökonomie. Vol. 1. Wiegant, Hempel & Parey.

- Waddell, P., Borning, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M., Ulfarsson, G., 2003. Microsimulation of urban development and location choices : Design and implementation of urbansim. *Networks and Spatial Economics* 3 (1), 43–67.
- Waddell, P., Ulfarsson, G. F., Franklin, J. P., Lobb, J., 2007. Incorporating land use in metropolitan transportation planning. *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 41 (5), 382 – 410.
- Wegener, M., Furst, F., 2004. Land-use transport interaction : state of the art. Available at SSRN 1434678.
- Weisbrod, B. A., 1964. Collective-Consumption services of Individual-Consumption goods. *The Quarterly Journal of Economics* 78 (3), 471–477.
- Weisz, H., Steinberger, J. K., Aug. 2010. Reducing energy and material flows in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (3), 185–192.
- West, J., Hoekstra, M., Meer, J., Puller, S. L., 2015. Vehicle Miles (Not) Traveled : Why Fuel Economy Requirements Don't Increase Household Driving.
- Williams, J. H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow, W. R., Price, S., Torn, M. S., 2012. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050 : The pivotal role of electricity. *Science* 335 (6064), 53–59.
- Wilson, A. G., 1967. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation research* 1 (3), 253–269.
- Windisch, E., 2011. The potential for privately owned electric cars in the paris region : a disaggregate approach. In : *European Electric Vehicle Congress (EEVC)*. pp. 26–28.
- Yeh, S., Farrell, A., Plevin, R., Sanstad, A., Weyant, J., 2008. Optimizing us mitigation strategies for the light-duty transportation sector : what we learn from a bottom-up model. *Environmental science & technology* 42 (22), 8202–8210.
- Zahavi, Y., Talvitie, A., 1980. Regularities in travel time and money expenditures. No. 750.
- Zubaryeva, A., Thiel, C., 2013. Paving the way to electrified road transport. JRC Scientific and policy report.

Annexes

Electric vehicle development and city shape

Manon Solignac^{1,1,*}, Vincent Viguie¹, Celine Guivarch¹

^a*CIREN, Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France*

Abstract

Electric vehicle is highlighted as a solution to tackle transport emissions growth. But as city shape and transport emissions depend one on the other, we try to evaluate what is the impact of city shape on the electric vehicle (EV) efficacy in terms of CO₂ reduction, and what is the impact of the EV on city shape?

Using the classical urban economics framework, we simulate three fictional circular cities and compare the variations of density induced by EV availability and the CO₂ emissions avoided in each case. We conclude that the EV will encourage urban sprawl in the most sprawled cities but we also show that it is in these sprawled and large cities that EV is the most useful to avoid CO₂ emissions from the suburbs. EV is twice more efficient to avoid CO₂ emissions in large sprawled cities than in small ones. The main reason for this result lies in the EV owners location. Comparing the car choices in the urban area, we note that contrary what is usually expected, the electric car owners do not locate in the city center. Then using the NEDUM-2D model ([Gusdorf and Hallegatte, 2007](#); [Viguié and Hallegatte, 2012](#)) as an application of the previous exercise to a more realistic city. We compare the variation of density and emissions avoided in Ile de France and show that in a polycentric city both are weaker than in a monocentric city of the same size.

Keywords: Electric vehicle, City shape, CO₂ emissions

JEL: ..., ...

*Corresponding author

¹Tel: (33) 1 43 94 73 03 Fax: (33) 1 43 94 73 70, CIREN, Site du Jardin Tropical, 45bis, Av de la Belle Gabrielle F-94736 Nogent-sur-Marne, France.

1. Introduction

Urban areas represent around 70% of world CO₂ emissions ([International Energy Agency, 2008](#)) and as urbanization is increasing and cities are becoming wealthier, emissions are expected to follow this increase as well ([Poumanyong and Kaneko, 2010](#); [O'Neill et al., 2010](#)).

Depending on city, between 8% and 60% of these emissions are related to the transportation needs in urban areas([Satterthwaite, 2008](#); [Dodman, 2009](#)).

Transportation emissions seem to be linked to urban design as it has an influence on transport mode use and especially car use. In developed countries, and for the past decades, density has been correlated to travel-related CO₂ emissions ([Kennedy et al., 2009](#); [Newman and Kenworthy, 2006](#)). Indeed car traveled distances (and thus energy use and CO₂ emissions) decrease in average with density while the use of public transport increases with density ([Rickwood et al., 2008](#)). Therefore urban planning seems to be a tool to reduce energy use resulting of travel patterns ([Weisz and Steinberger, 2010](#)) by reducing travel distances and allowing use of public transport.

Consequently, compact cities associated with development of public transport infrastructures are considered to be more CO₂ efficient by reducing trip lengths and impacting modal choice ([Ewing et al., 2003](#); [Bento et al., 2003](#)) whereas sprawl and induced car use tend to increase the emissions. Indeed the implementation of public transportation network can't be efficient in already sprawled cities because distances are too long and density too low ([Frank and Pivo, 1994](#); [Creutzig, 2014](#)).

Urban shape determines transport system however urbanization also shows dependencies to transport system as they develop simultaneously ([Newman and Kenworthy, 1996](#); [Avner et al., 2014](#)). Urban form faces lock-in into the transport system in which the city grows.

As some cities are growing, along with the car availability, the development of public transport system over the whole city, to tackle emissions increase, is too expensive. Some cities are already sprawled and dependant on cars.

Compactness and public transports are not options for these sprawling cities anymore. Then clean technologies are seen as another solution to reduce travel-related CO₂ emissions of the urban areas. More specifically, electric vehicles offer a potential for emissions reductions ([McCollum](#)

and Yang, 2009; McCollum et al., 2014).

Indeed electric vehicles (EVs) are an option to reduce GHG emissions if increased electricity demand it induces comes from low carbon sources.

But then, knowing the potential link between transportation emissions and urban form, the interactions of electric vehicle availability and urban shape should also be explored.

Most of potential CO₂ reduction analysis show only one evaluation, at a national scale (IPCC et al., 2014; Kahn Ribeiro et al., 2007). These evaluations don't take into account the land-use specificities and variations of the territory at a smaller scale. This paper measures the impact of some urban shape characteristics on electric vehicle potential.

This could allow a more detailed appreciation of the conditions for electric vehicle efficiency to reduce CO₂ emissions in urban area.

What is the impact of city shape on the electric vehicle (EV) efficacy in terms of CO₂ reduction, and what is the impact of the EV on city shape ?

Is the electric vehicle an equivalent solution for all type of city ? Will its impact on households location choices lower its potential reduction of CO₂ emissions ? What are the determinants of the city shape that influence electric vehicle potential?

To answer this question, we choose to look at the interactions of the density profile of the city, as an approximation of city shape, and the electric vehicles use. We also consider the differences between monocentric and polycentric urban form (several job centers).

For this purpose, we use the classical urban economics framework, which simulates the spatial distribution of households in a city. To the classical model, we add a simulation of households transportation choices, based on discrete choice modelling. This allow us to take into account urban shape and transportation costs.

The article is organized as follows. In section 2 we first describe the simple monocentric version of the model, and introduce the electric vehicle in the transportation cost function. Then we describe the parameters setting of the transportation module we use for the numerical simulations that allows several technologies and transport mode. Then in order to look at the different impacts of EV availability in monocentric and polycentric urban form, we describe the NEDUM-2D model. The NEDUM-2D model (Viguié and Hallegatte, 2012; Viguié and Hallegatte, 2014) is an

application of the classical economics framework. It allows to look at the consequences of the development of the EV in 2050 in the specific case of polycentric city.

In section 3 we detail a numerical resolutions of both models. We simulate three fictional circular cities in order to highlight the main mechanisms in city shape variations. We consider two main parameters to distinguish these circular cities : population and transport system.

We considered a first monocentric city with a large population and a public transport system that seves each location. Then, to test the impact of the public transport system, we consider the same city, without public tranports. Finally, to explore the impact of the city size, we suppose a third city, with public transports but with a ten times less inhbitants. The small city without public transports is not showed in this article, as the impact of public transport in small cities is comparable to the one in the big cities.

We conclude that the largest city of the three is the one that sprawl the most with the EV availability. But it is also the one in which there are more CO₂ emissions avoided.

But these monocentric cities, especially when they are large, are less realistic than polycentric ones. For this reason, we considered the Ile de France urban area using NEDUM-2D with the polycentric version. This allows us to compare the results of this simulation to the more theoretical ones of the previous section. We conclude that for polycentric cities, EVs have less impact on sprawl and emissions.

2. Electric vehicle in the classical urban economics framework

2.1. Basic model

Here we introduce the electric vehicle technology in the classical economics framework (Muth, 1969; Alonso et al., 1964; Mills, 1967) summarized in Fujita (1989). This should allow us to assess the main mechanisms in the interaction of urban density profile and EVs. Let us use a model in which population density profile over the city results from households trade-off between transportation cost to commute to the center and real estate price (or equivalently housing surface). The city is supposed monocentric, with a radial transport system and households use it only to commute. Households individually compute their bid rent function (maximum rent at a given distance for the maximum level of utility) and their optimal dwelling size by maximizing the

following program:

$$[htb] \max_{Z,q} U(Z(r), q(r)) \quad \text{s.t.} \quad Z(r) + q(r) \cdot R(r) = Y - T(r) \quad (1)$$

Where r is the location in the city, $q(r)$ is the housing surface, $Z(r)$ is the remaining money for consumption goods else than transport and housing, $R(r)$ is the rent per unit of housing surface, Y is the total income, $T(r)$ is the cost of transportation.

Landowners combine land and capital to produce housing. They maximize their profit subject to urbanism constraints (ratio of building per unit of land) over land and capital at each location and compute housing production function depending on the rent.

Knowing the size of the population and the rent at the border of the city, we compute density profile of the city.

2.2. Transportation module

2.2.1. Electric vehicle in the transport cost function

There is an ongoing debate on the existence of an energy paradox concerning vehicle choice by households (Greene, 2010) and on the main drivers for this choice.

But here, we are only interested in the fuel type choice of a vehicle. Now, Bunch et al. (1993); Choo and Mokhtarian (2004); Ewing and Sarigöllü (1998); Greene (1989) show that this choice mainly rely on financial cost (vehicle price and fuel price). To use the previous results in presence of electric vehicles, we have to suppose that the different technologies mainly differ in their price and running cost (and autonomy for EV), and that the other characteristics of a car (brand, safety, style, options, etc..) are equally distributed over each technology type and are not determining in technology choice.² This means, in our simulation, that the choice for vehicle technology could rely only on cost concerns, i.e. on the TCO (Total Cost of Ownership).

We implement the basic model with a new transportation cost function, that includes the vehicle technology choice. Figure 1 illustrates the transport cost function used. It is composed of the minimum TCO over all modes and technologies for each traveled distance in the city. From $L = 0$

²This approximation is supported by the fact that the increase in fuel prices in the past few years has increased fuel efficiency and running costs influence on consumers car choices (Consumer Survey, 2011).

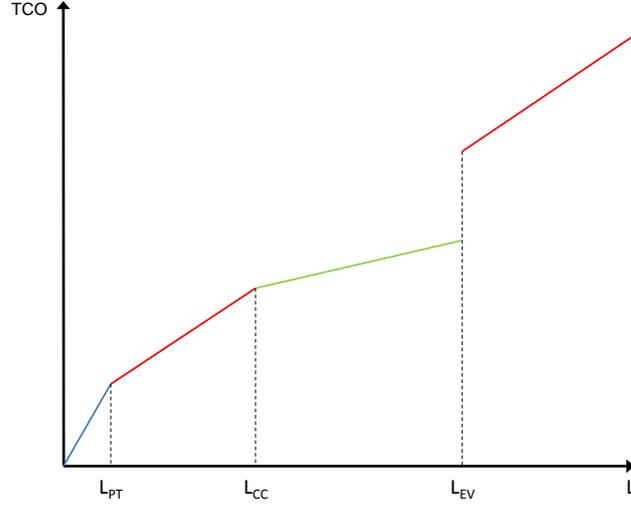


Figure 1: Transportation cost function in the city depends on distance to the center

to $L = L_{PT}$, the cheapest transportation mode are public transports. From $L = L_{PT}$ to $L = L_{CC}$, the cheapest transportation mode is the classic car. From $L = L_{CC}$ to $L = L_{EV}$, the cheapest transportation mode is the electric car. Beyond $L = L_{EV}$, electric car is not available because of its limited autonomy, then the classic car is again the cheapest transportation mode.

For each part of the curve, the higher the operational cost is, compared to the fixed cost, the higher the slope is.

More specifically, we choose to compute an Annual Total Cost of Ownership (ATCO Eq.2). Using ATCO instead of TCO to compare technologies involves that consumer choices rely on current fuel prices and not on fuel prices prediction. Indeed, it seems that car buyers generally forecast no change in fuel prices (Anderson et al., 2011).

$$ATCO = \frac{C_{Inv}}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t}} + L \cdot (c_{fuel} \cdot p_{fuel} + c_{elec} \cdot p_{elec}) \quad (2)$$

C_{Inv} is the price of the vehicle, L is the annual distance traveled by the household, for $j = fuel$ or $j = elec$, c_j is the consumption per kilometer for the technology j and p_j the price of the energy

used by the technology j , r is the discount rate and T the lifetime of the car.

In our first approach we make a numerical resolution to illustrate the impact of the EV introduction on three monocentric fictional cities.

2.2.2. Vehicle and transport mode choice

For this, we build a transportation module that introduce different technologies of cars and set parameters for it. The transportation module details the households choice for transportation modes and technologies. First the households of each location determine which car technology is the cheapest for their daily travel to job centers. Then the households choose the cheapest mode between car and public transport.

As explained in the previous section, ATCO is chosen to compare vehicles costs. ATCO depends on the total distance traveled by households each year, and therefore on the location of households in the city. We suppose that vehicle technology choice is strongly impacted by household choice location in the city.

The car and modal choices will rely on a discrete choice model (Palma and Thisse, 1989). The probability in each location for the choice of the technology and then the mode are calculated through a multinomial logit function depending on the differences of cost between these technologies (Salon, 2008; Washbrook et al., 2006), following equation 3 .

$$[H]msh_j = \frac{\exp(-\alpha \frac{c_j}{c_{min}})}{\sum_{i=k}^3 \exp(-\alpha \frac{c_k}{c_{min}})} \quad (3)$$

With α the logit parameter, c_j the ATCO of the technology j and c_{min} the cheapest ATCO of all the technologies.

We take into account three technologies (Tab.1) : the gasoline car is the cheapest one but it consumes more fuel than the diesel one, which is more expensive. The electric car (EV) is the most expensive of the three technologies but consumes electricity and comparatively less energy than the two other ones. We suppose the electric car has an autonomy of 100km. We consider characteristics of cars used in France to compare the three technologies. The consumption of the

diesel and gasoline cars are set to the mean consumption of each type of fuel in France ([MEED-DAT/SESP, 2008](#)).

	Gasoline	Diesel	Electric
Cost (€)	9 000	11 000	15 000
Fuel consumption (L/100km)	6.7	5.4	0
Electricity consumption (kWh/100km)	0	0	20

Table 1: Vehicles characteristics for the simulation

In our scenario, the EV price is set to 15 000 €. This could be seen as the potential long run (let us say in 2050) price of this technology considering efforts have been made to develop it. Today's price of most of these vehicles is around 30 000€. Along with several studies on EV price projections ([Cambridge Econometrics and Ricardo-AEA, 2013](#); [McKinsey&Company, 2010](#); [Catenacci et al., 2012](#)), we suppose a 50% fall that brings the EV from 2.7 times more expensive than the gasoline car to 1.3 times more expensive. This assumption may be optimistic but we considered that looking at the development of the EV suppose to make the assumption that this vehicle becomes competitive, either way this technology will remain a minor technology.

To compute the CO₂ emissions in a city, we used the modal share of each technology and mode and the carbon content of each of them. Concerning the electric car, we supposed a low carbon content for electricity, corresponding to the French one ([Doucette and McCulloch, 2011](#)). Indeed, we suppose that a world in which the electric car is available, is a world in which the electricity is decarbonized. Otherwise, this technology will not emerge.

2.3. NEDUM-2D

In order to look at different city shapes, we compare the impact of EV introduction in monocentric cities to its impact in polycentric cities, we use NEDUM-2D.

Polycentric version of NEDUM-2D is based on the same mechanisms than the monocentric one but the computation are done for each job center and localizations are computed in each cell of the grid through probability of going to each job center.

NEDUM-2D allows to simulate the spatial distribution of households and buildings density, real estate values and housing surfaces in a city using the classical urban economics framework

(Fujita, 1989) and taking into account realistic transportation cost, land use constraints and the inertias of the urban system.

The evolution of these variables partly relies on the households choices of housing surface and location. This choice results from the trade-off between what they spend for transport and the real estate price level.

The city is divided in a grid. In each cell, density depends on the real estate price level and the travel cost. The travel cost of a location depends on the distance to job center through the cost of transport and the cost of time.

In order to simulate a more realistic city, we use the polycentric version of the model on the Ile de France, which allows several jobs center. We introduce actual transportation networks and land use constraints for this region. For more detailed explanations on the NEDUM-2D model and its calibration on Ile de France see [Viguie and Hallegatte \(2014\)](#) and [Viguié et al. \(2014\)](#).

3. Numerical simulations

3.1. Monocentric circular cities

3.1.1. Three fictonnal cities

We consider two scenarios, one in which the electric car is available (is affordable and can be easily refueled) and one in which it is not. The first scenario is a world in which efforts have been deployed to make the technology affordable (technical progress, incentives like bonuses..), to develop the required infrastructures (charging station) to make the EV convenient and competitive with the other technologies. The second scenario corresponds to a world in which EV remains a minor technology. No effort has been done to develop it and encourage its diffusion, and it is not available at a large scale.

Now let us examine the differences in city structure induced by the two scenarios, for three different theoretical monocentric cities as described in the introduction (Fig.2). SmallPT is the smallest one, with 500 000 households,. BigPT is bigger and can be compared to a monocentric approximation of Ile de France (5 million households). BigCar is as big as BigPT in terms of population but public transport are less developed (almost nonexistent) and car traveled are faster than in BigPT. We can see in figure 2 that city 2 is denser and less sprawled than BigCar.

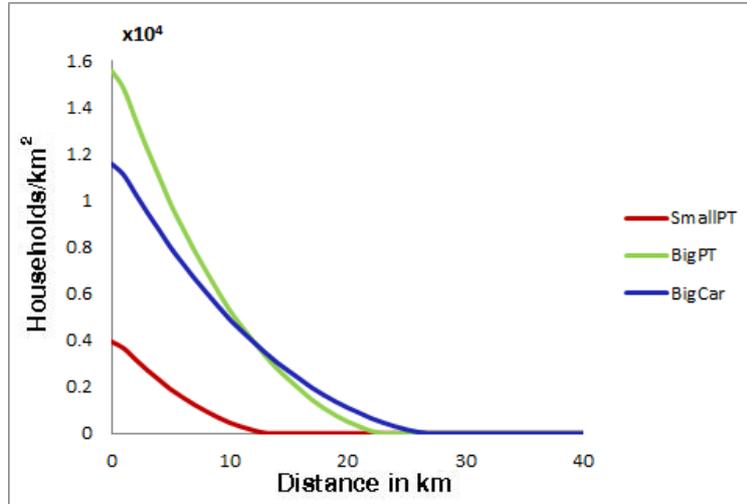


Figure 2: Density profile of 3 cities

In order to be able to compare the simulations, we keep all parameters identical between these cities, except for transports speed and population sizes.

These cities are imaginary but help us to analyze the different implications of EV availability on population density and of CO₂ emissions, as a function of cities population and existing transport system.

3.1.2. Consequences of EV availability depending on city density profile in circular cities

Concerning the evolution of city shape, figure 3 shows that EV availability encourages inhabitants of the center to locate further in the suburbs. The larger the city, the more visible the effect on density variation. In SmallPT, the effect is weak, density between the world with Ev and the world without doesn't vary a lot over the different localizations. In BigPT, density weakly decreases in a radius of approximately 15km and then increases more strongly (more than 5%) in a very thin zone of the further suburbs. In BigCar we can see more clearly a decrease of the density in the center and a progressive increase with distance to the center with a higher increase of density (more than 10%) on the fringe.

We now look at CO₂ emission avoided by computing the difference of between the world with EV and the world without, in each city. Table 2 shows that emission reductions due to EV availability are higher when the city is large and when public transit is not efficient (City 3).

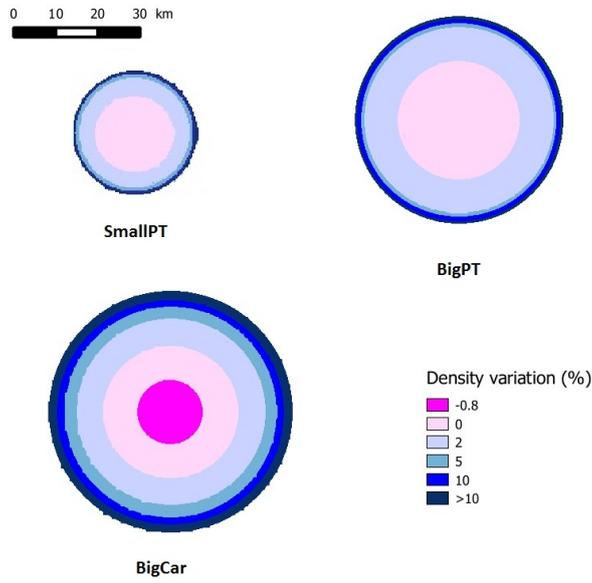


Figure 3: Density variations induced by EV availability in 3 fictional cities

	SmallPT	BigPT	BigCar
Variation of CO ₂ emissions	-26%	-33%	-36%

Table 2: Variations of CO₂ emissions when EV is available for the 3 cities

Looking at CO₂ emission variations in 2050, we notice a 26% are avoided when the EV is introduced in SmallPT, 33% in BigPT, and 36% in BigCar. Then the larger the city is and the more the car is used, the more efficient is the EV helps to avoid CO₂ emissions.

Why this result? If fuel prices are high enough, electric cars lower the cost of car in some locations, especially for the ones far from center in which public transportations takes too long. Indeed, car is used where public transit is inexistent or too much time consuming and among cars, EV is used when long traveled distances can cover the price the car (EV is expensive but running cost are lower). Then contrary to what is usually expected, EV users do not locate in the center of the city.

If we look at the location of potential EV owners among car users in a city, we can show three zones (Fig.4) around the city center. In the first one, EV is too expensive compared to other vehicle and fuel economies are not sufficient to make EV interesting. In the second zone, EV becomes interesting because households travel enough. In the third zone, EV autonomy does not allow to reach the city center, then there are no EV users. Figure 4 shows the size of the three zones with the fuel price, car prices and EV autonomy of table 1 and 4.

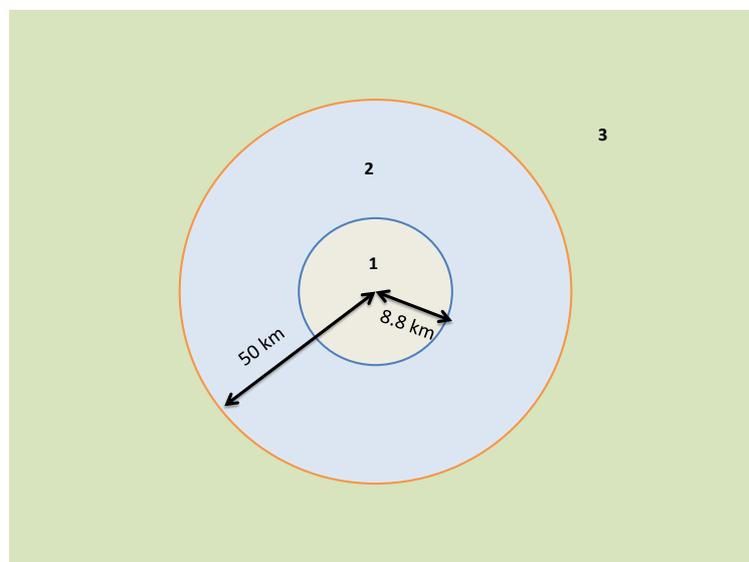


Figure 4: Zone of EV use. When households locate more than 8.8km away from the center, EV become interesting.

Another way of understanding these results is to calculate the amount of CO₂ avoided by electric

vehicle used in each city (Tab.3).

	SmallPT	BigPT	BigCar
Avoided CO ₂ per EV	0.60 tCO ₂ /EV	1 tCO ₂ /EV	1.2 tCO ₂ /EV

Table 3: Amount of CO₂ avoided by electric vehicle used in three fictional cities

One electric vehicle allows to avoid twice as much CO₂ emission in BigCar as in SmallPT because EV is more used in bigger cities.

Policies goals are often expressed in terms of number of electric vehicles on the road. We show here, that depending on the form of the city the users live in, the emissions reduction produced by the same number of EV can vary.

Moreover, if we suppose the investment needed to make one electric vehicle available is the same in all cities, we can say that the ton of CO₂ avoided in SmallPT is twice the cost of the one in BigCar and 1.7 times the cost of the one in BigPT.

This suggests that electric vehicle development should be first implemented in big cities with no public transport system.

3.2. *Potential location of EV owners and impact of EV availability in a polycentric city : Ile de France*

Ile de France (IDF) is a large urban area of 5 million of households and that spreads within a radius of around 40km. It benefits from an efficient public transport network. This city can be compared to City 2.

We considered the polycentric version of the model has to be used, as it allows to take into account different job centers.

Our results depends on the projections we use for the energy prices (fuel and electricity). We make a scenario for these prices (Tab.4), corresponding to the baseline scenario of EIA (2013). We suppose the average income of the city increase of 1.9% per year and population of 0.7%(UNDP,2014).

We first looked at the EVs owners location in Ile de France remembering we based the choice of the vehicle on its cost,in order to see if we can find the same pattern as previously. In figure 5a,

2050 (mean annual increase since 2013)	
Fuel prices	+1.5%
Electricity prices	+1%
Vehicle consumption	unchanged
EV price (€)	15 000
Public transport prices	+1%
Average Income	+1.9%
Population	+0.7%

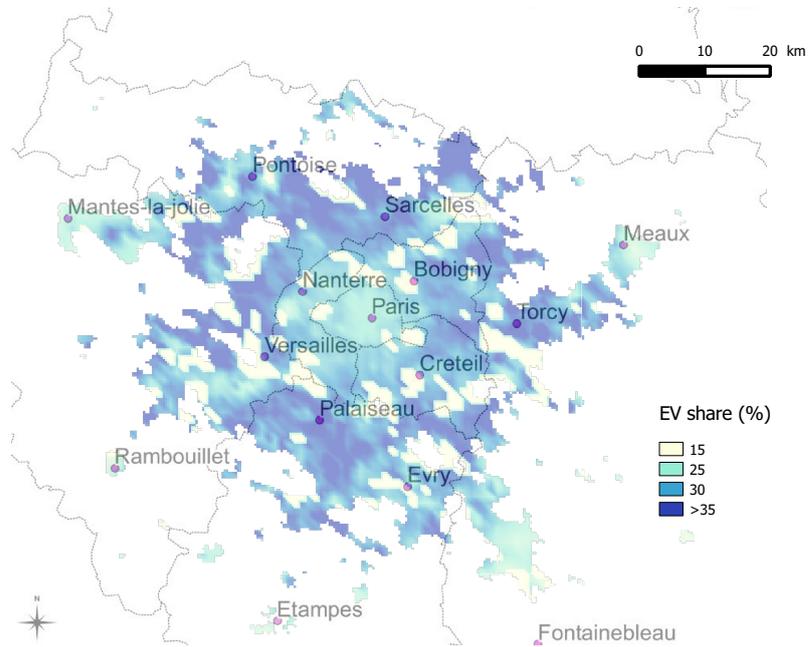
Table 4: Scenarios

EV is less used in the center within a radius of approximately 10km. We can also see that EV is less present around the main job centers.

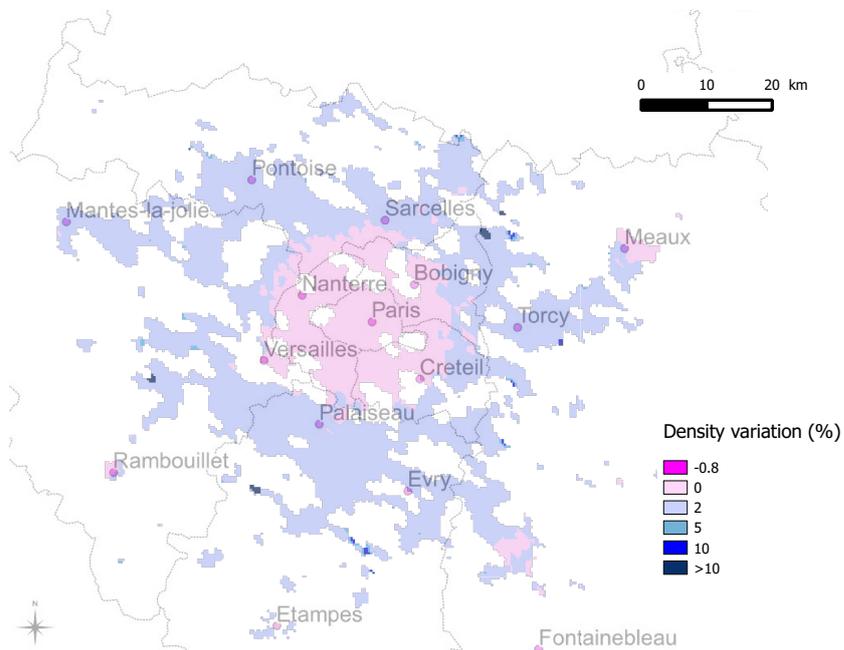
For a same built surface, EV should be less used in a polycentric city as the agglomeration of several job centers results in overlapping the zones of figure 4. Then the polycentric nature of IDF lowers the average driven distances to commute.

The EV become less interesting and its impact on density less important. Indeed if we look at the density variations induced by the EV availability in figure 5b, we notice the effect is less visible than in BigPT in the furthest suburbs. Once again, the overlaying of the density variations of BigPT in figure 3 show that existence of several job centers induces an overlapping of the parts of BigPT concerned by highest increase of density.

Concerning the CO2 emissions, 35% of them are avoided when the EV is available. This is more than for BigPT. This can be explained by the fact that the polycentric city (IDF) is more sprawled than the monocentric one (BigPT), then the longest traveled distances, which are concerned by EV use, must be more numerous in IDF than in BigPT.



(a) Distribution of electric car in Ile de France in 2050.



(b) Variation of density when EV is available in Ile de France in 2050.

Figure 5: Potential location of EV owners and impact of EV availability in Ile de France

4. Conclusion

The main message for policy considerations on transportation in urban areas, is to take into account the relevance of each policy for each urban form. Here availability of EV does not have the same implications on CO₂ emissions, depending on city shape.

For all cities included in the second zone (when they are supposed to be monocentric), EV availability will play a larger role in avoiding CO₂ than for the ones in the first zone.

The efficiency of the electric vehicle in term of avoided CO₂ emission is linked and conditioned to urban sprawl and to the use of public transportation. The larger the city is and the less public transportation there is, the more the EV is used when available and the more CO₂ emissions are avoided. In large city like IDF, EV is efficient but flattens the density profile. This result is due to the fact that EV is financially interesting for households that drive more kilometers. These households locate at the edge of the city and EV availability allows them to leave further away from the center as it reduces cost of car use for these locations. In small city, location at the edge are not far enough from the center to make EV interesting in reducing travelling costs. When public transports are available, they compete with EV and make it less interesting in further locations.

Then we can conclude that the EV will encourage urban sprawl in already sprawled cities but we also show that it is in these sprawled and large cities that this car is the most useful to avoid CO₂ emissions from the suburbs.

Like compact cities which need public transport to reduce CO₂ emissions, sprawled cities that don't have the possibility to develop public transport, can rely on clean technologies like EV to reduce their emissions.

But sprawl has been pointed out to have other negative impacts. For example, health problems (Ewing et al., 2008) or rise in public services costs (Carruthers and Ulfarsson, 2003). Then the cost of these effects, has to be taken into account to evaluate the potential benefits from introducing EV in sprawled cities.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the financial support of the IMD (Institut de la Mobilité Durable from Renault and ParisTech) for this research

References

- Alonso, W., et al., 1964. Location and land use. toward a general theory of land rent. Location and land use. Toward a general theory of land rent.
- Anderson, S. T., Kellogg, R., Sallee, J. M., 2011. What do consumers believe about future gasoline prices? Tech. rep., National Bureau of Economic Research.
- Avner, P., Rentschler, J. E., Hallegatte, S., 2014. Carbon price efficiency: Lock-in and path dependence in urban forms and transport infrastructure. World Bank Policy Research Working Paper (6941).
- Bento, A. M., Cropper, M., Mobarak, A. M., Vinha, K., 2003. The impact of urban spatial structure on travel demand in the united states. World Bank policy research working paper (3007).
- Bunch, D. S., Bradley, M., Golob, T. F., Kitamura, R., Occhiuzzo, G. P., 1993. Demand for clean-fuel vehicles in california: A discrete-choice stated preference pilot project. Transportation Research Part A: Policy and Practice 27 (3), 237 – 253, special Issue Energy and Global Climate Change.
- Cambridge Econometrics, Ricardo-AEA, 2013. An economic assessment of low carbon vehicles.
- Carruthers, J. I., Ulfarsson, G. F., 2003. Urban sprawl and the cost of public services. Environment and Planning B 30 (4), 503–522.
- Catenacci, M., Verdolini, E., Bosetti, V., Fiorese, G., Ameli, N., 2012. Going electric : Expert survey on future of batteri technologies for electric vehicles. Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Choo, S., Mokhtarian, P. L., 2004. What type of vehicle do people drive? the role of attitude and lifestyle in influencing vehicle type choice. Transportation Research Part A: Policy and Practice 38 (3), 201 – 222.
- Consumer Survey, 2011. Survey: Cost savings are driving shoppers to better fuel economy. Tech. rep.
- Creutzig, F., Dec. 2014. How fuel prices determine public transport infrastructure, modal shares and urban form. Urban Climate 10, 63–76.
- Dodman, D., 2009. Blaming cities for climate change? an analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. Environment and Urbanization 21 (1), 185–201.
- Doucette, R. T., McCulloch, M. D., 2011. Modeling the CO2 emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. Energy Policy 39 (2), 803–811.
- EIA, 2013. Annual energy outlook 2013. Tech. rep., Energy Information Administration.
- Ewing, G. O., Sarigöllü, E., 1998. Car fuel-type choice under travel demand management and economic incentives. Transportation Research Part D: Transport and Environment 3 (6), 429 – 444.
- Ewing, R., Pendall, R., Chen, D., 2003. Measuring sprawl and its transportation impacts. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1831 (1), 175–183.
- Ewing, R., Schmid, T., Killingsworth, R., Zlot, A., Raudenbush, S., 2008. Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity. In: Urban Ecology. Springer, pp. 567–582.
- Frank, L. D., Pivo, G., 1994. Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel: single-occupant vehicle, transit, and walking. Transportation research record, 44–44.
- Fujita, M., 1989. Urban economic theory: land use and city size. Cambridge university press.
- Greene, D. L., 1989. Motor fuel choice: An econometric analysis. Transportation Research Part A: General 23 (3), 243 – 253, special Issue Alternative Fuels.
- Greene, D. L., 2010. How consumers value fuel economy: A literature review. Tech. rep.
- Gusdorf, F., Hallegatte, S., 2007. Compact or spread-out cities: Urban planning, taxation, and the vulnerability to transportation shocks. Energy Policy 35 (10), 4826–4838.
- International Energy Agency, 2008. World energy outlook 2008. International Energy Agency ; Turpin Distribution, Paris; New Milford, Conn.
- IPCC, Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Nuñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., Figueroa Meza, M., Fulton, L., Kobayashi, S., Lah, O., McKinnon, A., Newman, P., Ouyang, M., Schauer, J., Sperling, D., Tiwari, G., 2014. 2014: Transport. in: Climate change 2014: Mitigation of climate change. contribution of working group iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (edenhofer, o., r. pichs-madruga, y. sokona, e. farahani, s. kadner, k. seyboth, a. adler, i. baum, s. brunner, p. eickemeier, b. kriemann, j. savolainen, s. schlömer, c. von stechow, t. zwickel and j.c. minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Kahn Ribeiro, S., Kobayashi, S., Beuthe, M., Gasca, J., Greene, D., Lee, D. S., Muromachi, Y., Newton, P. J., Plotkin, S., Sperling, D., et al., 2007. Transport and its infrastructure. *Climate change*, 323–385.
- Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havranek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., Mendez, G. V., 2009. Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology* 43 (19), 7297–7302.
- McCollum, D., Krey, V., Kolp, P., Nagai, Y., Riahi, K., 2014. Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization. *Climatic change* 123 (3-4), 651–664.
- McCollum, D., Yang, C., Dec. 2009. Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications. *Energy Policy* 37 (12), 5580–5596.
- McKinsey&Company, 2010. A portfolio of powertrains for europe a fact-based analysis. Tech. rep.
- MEEDDAT/SESP, 2008. Le bilan de la circulation, les comptes des transports en 2007 (tome 1). Tech. rep.
- Mills, E. S., 1967. An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. *The American Economic Review*, 197–210.
- Muth, R. F., 1969. Cities and housing; the spatial pattern of urban residential land use.
- Newman, P., Kenworthy, J., 2006. Urban design to reduce automobile dependence. *Opolis* 2 (1).
- Newman, P. W., Kenworthy, J. R., 1996. The land use—transport connection: An overview. *Land use policy* 13 (1), 1–22.
- O’Neill, B. C., Dalton, M., Fuchs, R., Jiang, L., Pachauri, S., Zigova, K., Oct. 2010. Global demographic trends and future carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (41), 17521–17526.
- Palma, A. d., Thisse, J.-F., 1989. Les modèles de choix discrets. *Annales d’Économie et de Statistique* (14), pp. 151–190.
- Poumanyong, P., Kaneko, S., Dec. 2010. Does urbanization lead to less energy use and lower CO2 emissions? a cross-country analysis. *Ecological Economics* 70 (2), 434–444.
- Rickwood, P., Glazebrook, G., Searle, G., Mar. 2008. Urban structure and energy—a review. *Urban Policy and Research* 26 (1), 57–81.
- Salon, D., 2008. Neighborhoods, cars, and commuting in new york city: A discrete choice approach.
- Satterthwaite, D., 2008. Cities’ contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization* 20 (2), 539–549.
- Viguié, V., Hallegatte, S., Rozenberg, J., Sep. 2014. Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale: A case study on paris. *Technological Forecasting and Social Change* 87, 305–324.
- Viguié, V., Hallegatte, S., 2012. Trade-offs and synergies in urban climate policies. *Nature Climate Change* 2 (5), 334–337.
- Viguié, V., Hallegatte, S., 2014. Urban infrastructure investment and rent-capture potentials. *World Bank Policy Research Working Paper* (7067).
- Washbrook, K., Haider, W., Jaccard, M., Nov. 2006. Estimating commuter mode choice: A discrete choice analysis of the impact of road pricing and parking charges. *Transportation* 33 (6), 621–639.
- Weisz, H., Steinberger, J. K., Aug. 2010. Reducing energy and material flows in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (3), 185–192.

Electric vehicles and urban policies to reduce CO₂

Manon Solignac¹

July 22, 2016

¹ Corresponding author (solignac@centre-cired.fr) Cired, Nogent-sur-Marne, 94130 France

1 Introduction

The electric vehicle is a technology that is often proposed to address CO₂ emissions increase in the cities (McCollum and Yang, 2009a; McCollum et al., 2014). Especially where electricity is decarbonated. We can show that electric vehicle are quite efficient in avoiding CO₂ emissions in large and sprawled cities, where people drive enough to make this technology financially viable. However, technology may not always be sufficient to reduce CO₂ emission.

As cities are expected to grow, specially in developing countries, urban planification could play a major role in CO₂ emissions mitigation (?). In some types of cities, sprawl is seen as a major cause for GHG emissions, congestion, noise. Then compactness of cities is seen as an asset to limit CO₂ emissions (Ewing et al., 2003; Bento et al., 2003). Indeed, compactness is linked to a higher level of public transport use and then less emissions (Banister, 2008). For Glaeser and Kahn (2010) cities with land use restrictions emit less. Then urban planning is a tool to reduce energy use resulting of travel patterns (Weisz and Steinberger, 2010) by reducing travel distances and allowing use of public transport.

Several studies encourage the implementations of all policies available if climate mitigation targets are to be achieved (European Environment Agency, 2010; McCollum and Yang, 2009b). These policies can be classified in two levers: technological and infrastructure. The first one relies on vehicle improvements. The second one relies on changes in the structure of the mobility (behavioral and land use changes).

Both levers have their defaults but can be relevant to tackle emissions increases in the city. Most of all, these politics may have cross effects and are not inde-

pendant, because transportation emissions are linked to urban design (Kennedy et al., 2009; Newman and Kenworthy, 2006) and conversly, urban form depends on transportation systems (Newman and Kenworthy, 1996; Avner et al., 2014).

Lots of local policies are implemented at city scale, with various and sometimes overlapping goals. This may be the case of policies to limit sprawl and policies to develop EVs.

Here we try to evaluate to what extent EVs development policies and sprawl limitation could interact and maybe interfere.

For this we choose to test two policies. To limit sprawl and encourage compactness we choose to test a greenbelt policy. Greenbelt is a zone surrounding the city in which building is limited. Here, for the sake of simplification, we assume the greenbelt is a limit beyond which urbanisation is completely forbidden. This will allow us not to discuss about the possibility of building beyond the greenbelt "ring".

Policy for EV availability is modelled as a reduction of EV price. This reduction could result from direct subsidy on price or indirect subsidy on the EV sector.

In the first section, we define what we call density profile and explain the basic urban economics model and its extension developed at CIRED : NEDUM-2D. In the second section we describe the location of EV users. In the third section we compute avoided emissions when EV is introduced with or without greenbelt for different price level of the EV, using the basic urban economics model. Then we make the same exercise with an application on Ile de France, using NEDUM-2D to allow polycentrism.

2 Density profile and urban model

2.1 Localisation choices and density

All along this article we are going to use the density profile as main indicator to look at urban form. To define this expression, we consider two dimensions of urban form : population size and radius of the urbanized area. These two characteristics determine the density profile of the city, as city density results from the population in a urbanized area compared to the size of the area.

Here we assume population size is given. Concerning size of urbanized area, we follow (citer Bertaud, Newman et Kenworthy) and explain it by transportation system of the city. Indeed transportation modes available directly impact time and cost of travelling in the city and then localisation choice of households (citer Newman Kenworthy). For example, car dominant transport system are explain the spreading of urban areas.

The two characteristics above (population size and transportation system) are among the main variables used by urban economics to describe localisation choices in the city and then density profiles (Muth, 1969; Alonso et al., 1964).

None of the variables above are independent, indeed population size directly influences surface used on the ground (density cannot be infinite), which influences transportation system cost, which then impacts density through localisation choices. Then policies aiming at reducing CO₂ emissions through urbanisation restrictions, will influence transportation use and inversely policies willing to change transportation system will modify urbanised area. Urban economics models integrate these interaction and allow us to look at the results of different policies combinations.

2.2 Basic circular model

Here we introduce the electric vehicle technology in the classical economics framework (Muth, 1969; Alonso et al., 1964) summarized in Fujita (1989). This should allow us to assess the main mechanisms in the interaction of urban density profile and EVs. Let us use a model in which population density profile over the city results from households trade-off between transportation cost to commute to the center and real estate price (or equivalently housing surface). The city is supposed monocentric, with a radial transport system and households use it only to commute. Households individually compute their bid rent function (maximum rent at a given distance for the maximum level of utility) and their optimal dwelling size by maximizing the following program:

$$[htb] \max_{Z,q} U(Z(r), q(r)) \quad \text{s.t.} \quad Z(r) + q(r) \cdot R(r) = Y - T(r) \quad (1)$$

Where r is the location in the city, $q(r)$ is the housing surface, $Z(r)$ is the remaining money for consumption goods else than transport and housing, $R(r)$ is the rent per unit of housing surface, Y is the total income, $T(r)$ is the cost of transportation.

Landowners combine land and capital to produce housing. They maximize their profit subject to urbanism constraints (ratio of building per unit of land) over land and capital at each location and compute housing production function depending on the rent.

Knowing the size of the population and the rent at the border of the city, we compute density profile of the city.

2.3 NEDUM-2D

In a second time, we implement NEDUM-2D model which relies on urban economics theory to model more realistic cities like Ile de France (IDF). It allows to look at polycentric cities. (citer et relire le nechet consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la config..)edsrev7C6D864F20120101

Polycentric version of NEDUM-2D is based on the same mechanisms than the monocentric one but the computation are done for each job center and localizations are computed in each cell of the grid through probability of going to each job center.

NEDUM-2D allows to simulate the spatial distribution of households and buildings density, real estate values and housing surfaces in a city using the classical urban economics framework (Fujita, 1989) and taking into account realistic transportation cost, land use constraints and the inertias of the urban system.

The evolution of these variables partly relies on the households choices of housing surface and location. This choice results from the trade-off between what they spend for transport and the real estate price level.

The city is divided in a grid. In each cell, density depends on the real estate price level and the travel cost. The travel cost of a location depends on the distance to job center through the cost of transport and the cost of time.

In order to simulate a more realistic city, we use the polycentric version of the model on the Ile de France, which allows several jobs center. We introduce actual transportation networks and land use constraints for this region. For more detailed explanations on the NEDUM-2D model and its calibration on Ile de France see Viguie and Hallegatte (2014) and Vigié et al. (2014).

2.4 Transportation module

In both models we use a transportation module to describe transportation choices among technologies and modes available.

In this transportation module we build the cost function of transportation in the city.

We choose to rely on financial cost as the main driver for vehicle fuel choice (Ewing and Sarigöllü, 1998; Greene, 1989). We suppose that the different technologies mainly differ in their price and running cost (and autonomy for EV), and that the other characteristics of a car (brand, safety, style, options, etc..) are equally distributed over each technology type and are not determining in technology choice.¹ This means, in our simulation, that the choice for vehicle technology

¹This approximation is supported by the fact that the increase in fuel prices in the past few years has increased fuel efficiency and running costs influence on consumers car choices (Consumer Survey, 2011).

could rely only on cost concerns, i.e. on the TCO (Total Cost of Ownership).

Then private transportation cost is composed of the minimum TCO over all modes and technologies for each traveled distance in the city.

More specifically, we choose to compute an Annual Total Cost of Ownership (Eq.2). Using ATCO instead of TCO to compare technologies involves that consumer choices rely on current fuel prices and not on fuel prices prediction. Indeed, it seems that car buyers generally forecast no change in fuel prices (Anderson et al., 2011).

$$ATCO = \frac{C_{Inv}}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+i)^t}} + L \cdot (c_{fuel} \cdot p_{fuel} + c_{elec} \cdot p_{elec}) \quad (2)$$

C_{Inv} is the price of the vehicle, L is the annual distance traveled by the household, c_j is the consumption per kilometer for the technology j and p_j the price of the energy used by the technology j , i is the discount rate and T the lifetime of the car.

Using ATCO, we compute transportation choices for households. First the households of each location determine which car technology is the cheapest for their daily travel to job centers. Then the households choose the cheapest mode between car and public transport.

Available technologies for private transportation are described in table 1.

	Gasoline	Diesel	Electric
Cost (€)	9 000	11 000	25 000
Fuel consumption (L/100km)	6.7	5.4	0
Electricity consumption (kWh/100km)	0	0	20

Table 1: Vehicles characteristics for the simulation

The consumption of the diesel and gasoline cars are set to the mean consumption of each type of fuel in France (MEEDDAT/SESP, 2008).

To compute the CO₂ emissions in a city, we used the modal share of each technology and mode and the carbon content of each of them. Concerning the electric car, we supposed a low carbon content for electricity, corresponding to the French one (Doucette and McCulloch, 2011). Indeed, a world in which the electric car is available, is a world in which the electricity is decarbonized. Otherwise, this technology will not emerge. Indeed its success as a decarbonization option depends on the transformation of the carbon content of the power generation sources (Hawkins et al., 2012). However, decarbonization of electricity is necessary to reach climate stabilization (Williams et al., 2012). Audoly et al.

(2014) show that zero-carbon electricity is achievable in several scenarios even without requiring all carbon free technologies.

3 Zones of EV use

If we look at the location of potential EV owners among car users in a city, we can show three zones (Fig.1) around the city center. In the first one, EV is too expensive compared to other vehicle and fuel economies are not sufficient to make EV interesting. In the second zone, EV becomes interesting because households travel enough. In the third zone, EV autonomy does not allow to reach the city center, then there are no EV users.

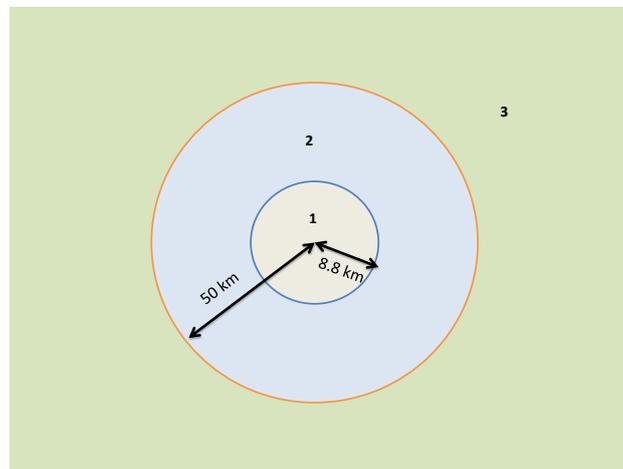


Figure 1: Zone of EV use. When households locate more than 8.8km away from the center, an EV at 15 000€ becomes interesting.

Then, depending on city size and car price, zone of EV use will not have the same size and position relatively to the city surface. When EV price increases, the first zone become wider and the ring of EV use (zone 2) becomes thinner. If city is small it can be included inside the first zone and no households in the city will use EV.

4 EV price and greenbelt size

Figure 2 shows the greenbelt with dashed green line around the city urbanized area in 2015. The hatched central circle is the zone in which EV are not cost

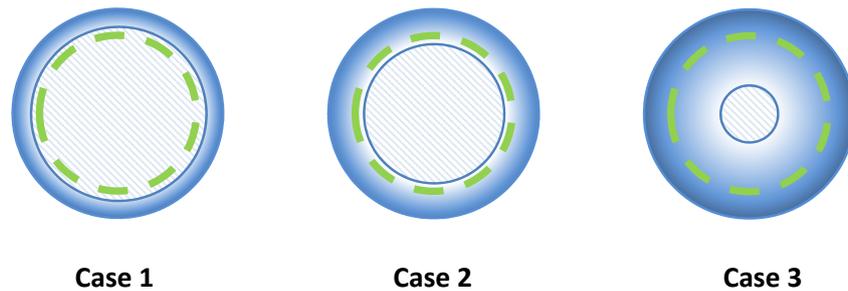


Figure 2: Zone of EV use. When households locate more than 8.8km away from the center, EV become interesting.

effective. The fading blue ring illustrates the potential ownership rates of EV that increases with the distance to city center up to the autonomy limit of the car.

Price of the EV vehicle directly impacts the size of the central circle. When this price increases, the circle downsizes. In case 1, EV is expensive and no (or few) household use it inside the greenbelt limit. Without greenbelt, city would be more spread but still not enough to make EV cost effective even at its border.

In case 3, EV is cheap and lots of households use it to travel. Implementing a greenbelt reduces the driven distances.

In case 2, the situation is less simple, in one hand greenbelt shorten driven distances, but in another hand, it prevents the city from spreading to the zone in which households start to use EV and then emit less.

The intuition says there may be a price interval in which greenbelt policies and EV subsidy trigger opposite mechanisms.

5 Potential CO2 reduction and mix of policies

5.1 Method and scenario

Now, we can look at the interactions between policies dealing directly with city density management (greenbelt policy) and policy dealing with clean technologies introduction (EV subsidy).

We first use the monocentric circular model on three fictional cities for today (2015) and for 2050.

For this, we assume three different city profiles. SmallCity is the smallest one, with 500 000 households, it can be compared in terms of population to Toulouse or Dublin. BigCity and BigCityNoPT are bigger and can be compared to some metropolis like Paris or London (5 million households). BigCity is denser and less sprawled than BigCityNoPT. BigCityNoPT public transport are less developed (almost non-existent) and car traveled are faster than in BigCity. These cities are imaginary but help us to analyse the different impact of two types of policy and their interactions.

To look at policies concerning city structure we implement a greenbelt policy. What we call greenbelt is a building limit with the size of the city in 2015. Then as population grows, city has to become denser in average.

To look at policies concerning technologies, we consider electric vehicle as available at a large scale, and we test different levels of subsidy on the price of the vehicle. EV price is first set to 25 000€ to illustrate the case in which no subsidy or effort is done to make the EV competitive with the other technologies. Then price decline to 9000€ to illustrate the extreme case in which EV as the same price than the cheapest technology. Price fall of EV here can be interpreted as direct subsidy on the price or indirect subsidy of the industry to allow price to decline.

We make a scenario for 2050, when electric vehicle could be available at large scale. This scenario is presented in 2.

	2050 (mean annual increase since 2013)
Fuel prices	+1.5%
Electricity prices	+1%
Vehicle consumption	unchanged
EV price (€)	25 000 to 9 000
Public transport prices	+1%
Average Income	+1.9%
Population	+0.7%

Table 2: Scenarios

5.2 Emissions reductions resulting of policies interaction

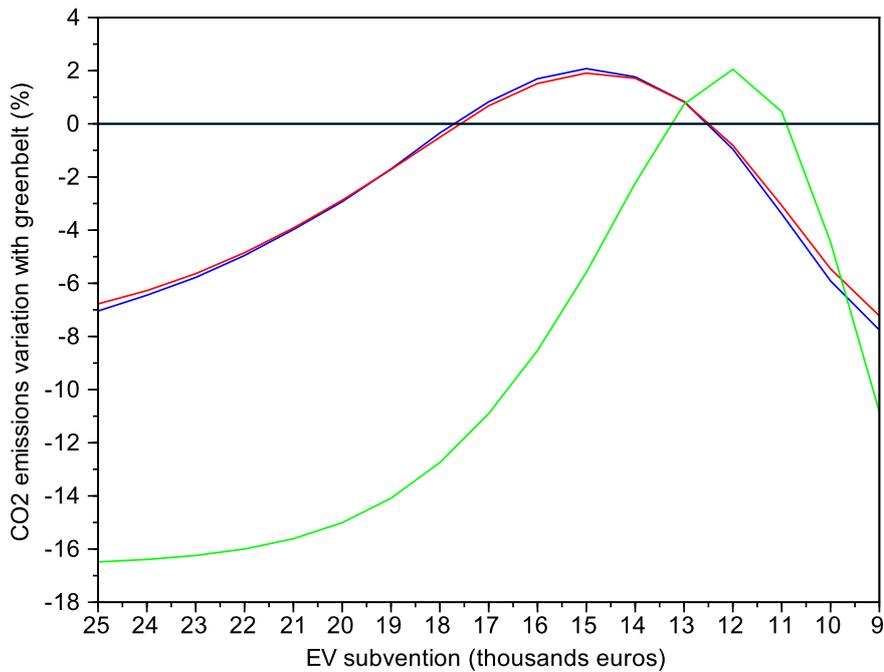


Figure 3: Greenbelt impact on emission for different EV prices

Figure 3 shows the impact on emission of greenbelt implementation for different level of EV prices. This figure shows the results for the three cities described above here.

We can see the impact of greenbelt has the same magnitude for BigCity and BigCityNoPT. It means the results are the same whereas the city is sprawled with poor public transport system or the city is more compact. The results for Small-City follow the same shape but with a different magnitude. Greenbelt is twice more efficient in small city when EV is expensive and cheap. It becomes as much inefficient as for the two other cities but not for the same EV price.

The reason why greenbelt can be more efficient in SmallCity is that its density profile is more flat than the two other. Greenbelt then concern a higher part of the households, as relatively more households live near the border of the city. et au centre, on marche a pied et en tc, (meme systeme de seuil quavec ev)

Now looking at the general shape of these three curves, we notice two movements. In a first time, as EV become cheaper (subsidy policy) greenbelt become

less effective and can even worsen the situation (more emissions with greenbelt than without). It comes from the fact that the cheaper the EV is, the more the city wants to sprawl, as EV make remote location cheaper to drive to. Then EV encourage sprawl but make travel more CO₂ efficient. But greenbelt prevents this sprawl and then prevent EV use, up to a point at which EV alone is more efficient than EV and greenbelt. Here we move from Case 1 to Case 2 of figure 2.

Then in a second time, as EV price still decreases, greenbelt become effective again. Indeed, at this point, EV is used a lot through the city even inside the greenbelt limits and as greenbelt shorten traveled distances, it allows to decrease emissions from (here EV trips emits a small amount of CO₂). Here we move from Case 2 to Case 3 of figure 2.

There is a range of EV price, for each city in which EV subsidy policy and sprawl limitation policy interfere. Between 13 000 and 10 000€ for SmalCity and 17 000 and 12 000€ for BigCity and BigCityNoPT, EV price subsidy and greenbelt bring less emissions reduction than EV subsidy alone.

5.3 Additivity of policies

Looking at the emissions reductions that each policy offers and comparing it to the ones of both policies implemented together, we can see that in each level of policy and for each city, these policies are sub-additive (Fig.4).

Indeed both policies together show less emissions reduction than the sum of each policy reduction potential when implemented alone.

Moreover, beyond sub-additivity, both policies together, in some cases, increase emissions compared to when only one policy is implemented.

5.4 Policies efficiency and cost

Choosing between one policy or the other would require to have an evaluation of their cost.

In graph 5, we can see that the efficiency of each electric vehicle is not constant over the type of urban form and the level of the vehicle price. This could help us to suppose that the cost of such a policy isn't constant either.

The optimal price for electric vehicle is different for big and small cities. In big cities, the potential for avoided emissions is higher at 18 000€ . For this price of electric vehicle, adding a greenbelt does not change the amount of emissions avoided. It suggest that adding a greenbelt would be inefficient. For small cities, electric vehicle has a higher potentiel for a 19 000€ price. In this situation adding a greenbelt decreases emissions in the city. Choosing to combine both policies here, would depend on the cost of each of one.

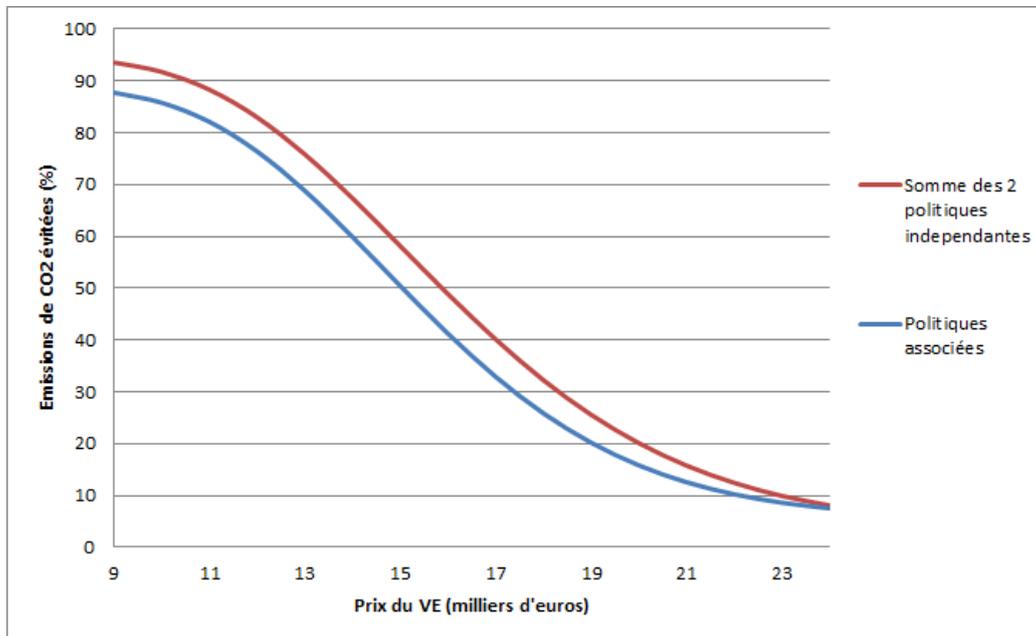


Figure 4: Emissions variation when both policies are implemented and sum of avoided emissions of both policies

5.5 Application on Paris

We run NEDUM-2D model on Ile de France (Paris agglomeration) to look at greenbelt and EV policies interaction in a real city, with polycentrism. We observe a weak reduction of emissions when greenbelt is implemented and a weak variation of this effect along with EV price change (-0.2% to -0.3%).

This weak impact of the greenbelt is due to polycentrism. Greenbelt prevent urbanisation over the external limits of the city, but not in the less denser areas between the job centers.

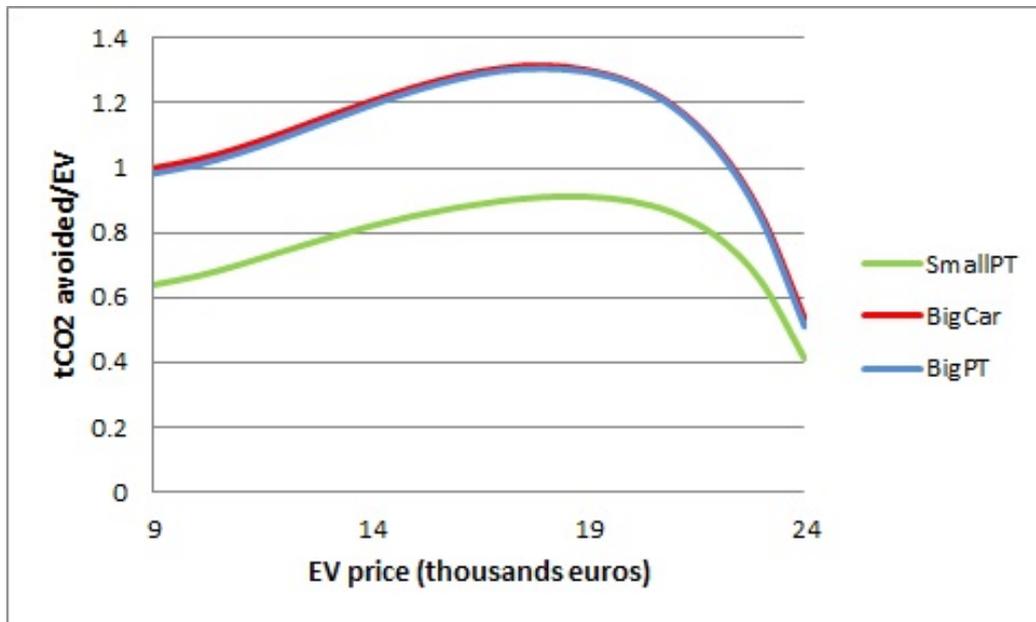


Figure 5: Tons of CO₂ avoided per electric vehicle depending on its price, for three monocentric circular cities

6 Conclusion

Emissions reductions allowed by electric vehicle development depend on other policies implementation. They depend on policies, like greenbelt, that rely on a different reduction lever (reduction of driven distances).

Then, the association of electric vehicle subvention and greenbelt policy is sub-additive and can even bring more émission than EV subvention alone. We have shown that the magnitude of these results depend on urban form.

In order to evaluate the emissions reduction potential of several combined policies in urban area, it is necessary to take into account the interactions that could result from the activation of different levers and the the urban form in which they are implemented.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the financial support of the IMD (Institut de la Mobilité Durable from Renault and ParisTech) for this research

References

- Alonso, W., et al., 1964. Location and land use. toward a general theory of land rent. Location and land use. Toward a general theory of land rent.
- Anderson, S. T., Kellogg, R., Sallee, J. M., 2011. What do consumers believe about future gasoline prices? Tech. rep., National Bureau of Economic Research.
- Audoly, R., Vogt-Schilb, A., Guivarch, C., 2014. Pathways toward zero-carbon electricity required for climate stabilization. World Bank Policy Research Working Paper (7075).
- Avner, P., Rentschler, J. E., Hallegatte, S., 2014. Carbon price efficiency: Lock-in and path dependence in urban forms and transport infrastructure. World Bank Policy Research Working Paper (6941).
- Banister, D., 2008. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy* 15 (2), 73 – 80, new Developments in Urban Transportation Planning.
- Bento, A. M., Cropper, M., Mobarak, A. M., Vinha, K., 2003. The impact of urban spatial structure on travel demand in the united states. World Bank policy research working paper (3007).
- Consumer Survey, 2011. Survey: Cost savings are driving shoppers to better fuel economy. Tech. rep.
- Doucette, R. T., McCulloch, M. D., 2011. Modeling the CO2 emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. *Energy Policy* 39 (2), 803–811.
- European Environment Agency (Ed.), 2010. Towards a resource-efficient transport system. No. 2010,2 in EEA report. Office for Official Publ. of the European Union, Luxembourg.
- Ewing, G. O., Sarigöllü, E., 1998. Car fuel-type choice under travel demand management and economic incentives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 3 (6), 429 – 444.
- Ewing, R., Pendall, R., Chen, D., 2003. Measuring sprawl and its transportation impacts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1831 (1), 175–183.
- Fujita, M., 1989. Urban economic theory: land use and city size. Cambridge university press.

- Glaeser, E. L., Kahn, M. E., 2010. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of urban economics* 67 (3), 404–418.
- Greene, D. L., 1989. Motor fuel choice: An econometric analysis. *Transportation Research Part A: General* 23 (3), 243 – 253, special Issue Alternative Fuels.
- Hawkins, T. R., Gausen, O. M., Strømman, A. H., Sep. 2012. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (8), 997–1014.
- Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havranek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., Mendez, G. V., 2009. Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology* 43 (19), 7297–7302.
- McCollum, D., Krey, V., Kolp, P., Nagai, Y., Riahi, K., 2014. Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization. *Climatic change* 123 (3-4), 651–664.
- McCollum, D., Yang, C., Dec. 2009a. Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications. *Energy Policy* 37 (12), 5580–5596.
- McCollum, D., Yang, C., 2009b. Achieving deep reductions in us transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications. *Energy Policy* 37 (12), 5580–5596.
- MEEDDAT/SESP, 2008. Le bilan de la circulation, les comptes des transports en 2007 (tome 1). Tech. rep.
- Muth, R. F., 1969. Cities and housing; the spatial pattern of urban residential land use.
- Newman, P., Kenworthy, J., 2006. Urban design to reduce automobile dependence. *Opolis* 2 (1).
- Newman, P. W., Kenworthy, J. R., 1996. The land use—transport connection: An overview. *Land use policy* 13 (1), 1–22.
- Viguié, V., Hallegatte, S., Rozenberg, J., Sep. 2014. Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale: A case study on paris. *Technological Forecasting and Social Change* 87, 305–324.
- Viguie, V., Hallegatte, S., 2014. Urban infrastructure investment and rent-capture potentials. *World Bank Policy Research Working Paper* (7067).

Weisz, H., Steinberger, J. K., Aug. 2010. Reducing energy and material flows in cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (3), 185–192.

Williams, J. H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow, W. R., Price, S., Torn, M. S., 2012. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: The pivotal role of electricity. *Science* 335 (6064), 53–59.

Valuing electric vehicle development: when households heterogeneity and uncertainty on battery cost increase the option value.

Manon Solignac^{1†}, Adrien Vogt-Schilb¹, Céline Guivarch^{1,2}

July 21, 2016

[†] Corresponding author (solignac@centre-cired.fr)

¹ Cired, Nogent-sur-Marne, 94130 France

² École des Ponts ParisTech, Champs-sur-Marne, 77420 France

Abstract. — The electric car is promoted as a way to reduce greenhouse gases emissions of private transportation. But the high total cost of ownership (TCO) of the electric car is highlighted as one of the main obstacles to its development.

Most of the calculations for the total cost of ownership (TCO) of the electric cars are done for one representative household, with a fixed annual traveled distance. In most of these calculations, the representative household does not travel enough to benefit from buying an electric car.

In this article, we add two elements to the traditional TCO calculations: heterogeneous households and uncertainty on energy and battery prices.

These calculations show that for some households, the availability of electric vehicles is a hedge against the risk of high future fuel or carbon prices. Surprisingly, uncertainty on batteries price increases the risk option value.

Keywords — Electric vehicle, Option value, Prices uncertainty, Heterogeneity

1 Introduction

The electrification of private transportation could be a way to reduce future greenhouse gases emissions and is considered as essential to reach climate policies targets (McCollum et al., 2014; Sioshansi and Denholm, 2009; Hawkins et al., 2013; Bosetti and Longden, 2013). Its success as a decarbonization option depends on the transformation of the carbon content of the power generation sources (Hawkins et al., 2012). However, decarbonization of electricity is necessary to reach climate stabilization (Williams et al., 2012). Audoly et al. (2014) show that

zero-carbon electricity is achievable in several scenarios even without requiring all carbon free technologies.

Low autonomy of batteries for the electric vehicle (EV) is highlighted to be an obstacle to its large scale adoption (Bunch et al., 1993; Ewing and Sarigöllü, 1998). More than the effective autonomy itself (250km for the last models), it is the apprehension of this limited autonomy and the charging time that discourages EV adoption (Tran et al., 2012).

Then one of the main remaining obstacles to electric vehicle development is its the private cost (García and Miguel, 2012; Ewing and Sarigöllü, 1998). The question of the economical viability of this technology becomes essential to determine if it could play a role in climate stabilization.

Most of the calculations for total cost of ownership (TCO) of electric cars are done for one representative household, with a fixed annual travelled distance (Crist, 2012; Prud'homme and Koning, 2012). In most of these calculations, the representative household does not travel enough to benefit from buying an electric car (van Vliet et al., 2011; Propfe et al., 2020): lower fuel costs do not compensate higher investment cost, mainly due to battery price.

Technical debate considers that the electric car is cost effective only if the battery price becomes low enough and the fuel price become high enough and that either way we should wait to develop this technology. TCO calculations are done, most of the time, for one single or only a few scenarios for energy and battery prices.

For example, in France, the Commissariat Général au Développement Durable¹ (CGDD) calculates a TCO for 15 years for an electric vehicle (EV) and for equivalent internal combustion engine (ICE) cars in 2020 with one future price for fuel and electricity (CGDD, 2011). EV TCO is higher in 2010 and almost equal to the ICE one in 2020, which could indicate that the electric vehicle is not interesting yet from an economic point of view and give the impression that EV development should be postponed.

In this article, we add two elements to traditional TCO calculations: heterogeneous households and uncertainty on energy and on battery prices. Our results allow to quantify to value of hedging against the uncertainty on future fuel prices that the electric vehicles provide to an heterogeneous society and the associated option value.

Household heterogeneity is important because the annual kilometers travelled vary significantly between households. The computation of TCO for the average household misses the part of the households that would positively value electric car availability. Here we use data of the French national transport survey to take into account households heterogeneity (ENTD, 2008).

¹ Commission for the sustainable development of the French Ecology ministry

The uncertainty on future fuel prices is important because, depending on future energy prices the cost analysis is based on, the electric car could be interesting for a household or not (Wu et al., 2015). In the scenarios in which fuel prices are high, the household should be interested in the electric vehicle (Thiel et al., 2010; Propfe et al., 2020). For example, Windisch (2011) calculates different TCO and underlines the magnitude of these TCO for different fuel prices and traveled kilometers.

Furthermore, uncertainty itself plays a role. Calculations in a framework without uncertainty miss the value of option that electric vehicles represent against uncertainties on the energy prices and potential CO₂ prices in particular.

Greene et al. (2014) conclude that electric vehicle in US "produces benefits that exceeds the cost of a transition", but that its future is "highly uncertain". Here we show that despite this uncertainty, the expected benefit is not zero. The availability of electric vehicles could be an option for some households against high and uncertain future fuel prices and possible high carbon price. Then this availability could be seen as a hedge that car users are ready to buy today to acquire with certainty the possibility to use this technology in the future.

In section 2, we explain the method used to compute the TCO and the option value. We first detail to what extent EVs represent an option for households and what we call option value. Then we compare the annualized total cost of ownership in 2020 in France of three types of vehicles for one representative household and without uncertainty.

In a second time we introduce uncertainty on energy prices (liquid fuels and electricity prices) in 2020 in the TCO computation. We compare two future worlds, one in which the EV is available and one in which it is not to compute the option value.

Then we consider several heterogeneous households and uncertain energy prices and find that the mean option value which is higher than in the previous case.

Finally, we add uncertainty on batteries costs.

In the third section, we describe the result for each step of our computations.

First, when comparing TCO in the case without uncertainty and heterogeneity, we find the same result than in the most of the studies, the EV is not interesting from an TCO perspective.

In the second computation we found that uncertainty creates a option value. Then the heterogeneity of households travelled kilometers is another reason for considering the EV availability as a hedge. This result is found with unlimited autonomy for EV but also holds with a limit for battery to 150km travelled in a day.

Finally, we find that uncertainty batteries costs increases the option value that EV the households are ready to pay. This somehow surprising result stems from

the asymmetric role played by battery cost. If electric vehicles are available but expensive, households who are not interested will not buy them and only lose the option value they paid for availability. But if the EVs turn out to be cheap, the availability is worth the investment for a larger part of the households.

To test the robustness of our results, in the fourth section we perform sensitivity analysis on the parameters on energy prices uncertainty and for EV price uncertainty. The option value remains above zero. Only when the discount rate for households rises to more than 25% , is the option value close to zero.

Then in the fifth section we aggregate the individual option values to compute the total value for all drivers. The aggregated option value is to be compared to the investment necessary to make the technology available at a large scale (for instance for charging infrastructures or for car makers firms profits).

2 Method

2.1 Value of the collective option to invest in EV development

Developing the EV sector today can be considered as building an option for the future availability of this technology. Indeed option value appears when an agent has to make a decision (most of the time an investment decision) facing uncertainty. A first version of the option relies on the risk aversion of the agent. Here the option value captures the willingness to pay for reducing the risk of a decision (Cicchetti and Freeman III, 1971; Weisbrod, 1964). This definition of the option is static, in which the agent compares the uncertain situation to the certain one.

Schmalensee (1972) highlights that this approach is static, the option value is computed in a timeless world. For Henry (1974) it does not consider the possibility to postpone the decision.

Henry (1974); Arrow and Fisher (1974); Hanemann (1989) introduce the notion of irreversibility in the decision process. Here the value of the option (called quasi-option value) relies on the irreversibility of the decision and the possibility to postpone the decision and wait for more information. This option value is the value of the information. Here the value can be positive even when the agent are not risk averse.

Dixit and Pindyck (1994) then developed another approach of the option value (real option value) that captures the value of waiting when learning is possible. The ROA allows to consider real investments as financial options.

The difference between the last two option value approach is detailed in Traeger (2013) : "the quasi-option value captures the value of learning conditional on preservation, while the Dixit-Pindyck option value captures the net value of preservation under learning".

But in these approaches, the uncertainty on the the benefits of the action resolves in the second period. In our study, the next period to invest collectively in the EV sector development does not bring more information as it will take time to achieve. We consider that availability of the EV at any period must be decided at the previous one, taking into account the time to build for the sector development. The time between the two period in our exercise is not, strictly speaking, a voluntary waiting period.

This time to built induces two type of irreversibility : the irreversibility of acting (the investment is a sunk cost) and the irreversibility of not acting (EV won't be available at the next period) (Ha-Duong, 1998). In fact, the cost of not acting, may not be negligible compared to the cost of the investment.

To sum up, our value of the option differs in two points : we consider two decision of action, a first one that is collective (invest in the EV availability) and at the second period one which is individual (buy the EV or not). We also consider that the collective action takes time to realize, the results of the action appears at the following period, waiting to act does not bring more information on the benefits of EV as you can't make it available instantaneously.

However the option we consider here can be compared, as the ROA, to a financial European call option. The car drivers may be willing to pay a what is called a premium to have the possibility (not the obligation) to buy an electric car in the future (here we supposed in 2020). As in Lemoine (2010), the flexibility that the electric mobility offers can be compared to a call option : "the purchase of a [...] battery has the same pay-off as the purchase of a strip of European call options in which the pay-offs are fuel savings". But he considers the daily choice that hybrid cars offer between driving with the battery or with the liquid fuel.

Thereafter, we decide to replace the word premium by the expression option value in order to avoid the implicit concepts linked to this word (risk aversion and insurance concepts).

We develop an approach similar to Schock et al. (1999) and Rozenberg et al. (2010) who consider the energy savings policies like a hedge for society. Policies for alternative fuel technologies development (collective decision) is an option that brings flexibility in the future (Ramjerdi and Fearnley, 2013). They allow the society to be able to face the situations where the energy prices become too high.

Here we suppose two future worlds, one in which the EV is available and one in which it is not (as represented in Fig.1). We assume here that if no money is spent for the EV technology development, it will not be available in the future. We carry out a Monte Carlo simulation with the energy prices parameters. The difference between the mean cost of driving a car for one year over the French drivers in the world with EV and the mean cost in the world without EV is the expected benefit, that we call the option value for hedging against energy prices uncertainty for this household. In other words, it's the maximum the households

would be willing to pay to be in a world where EV is available, knowing the distribution of probability for energy prices.

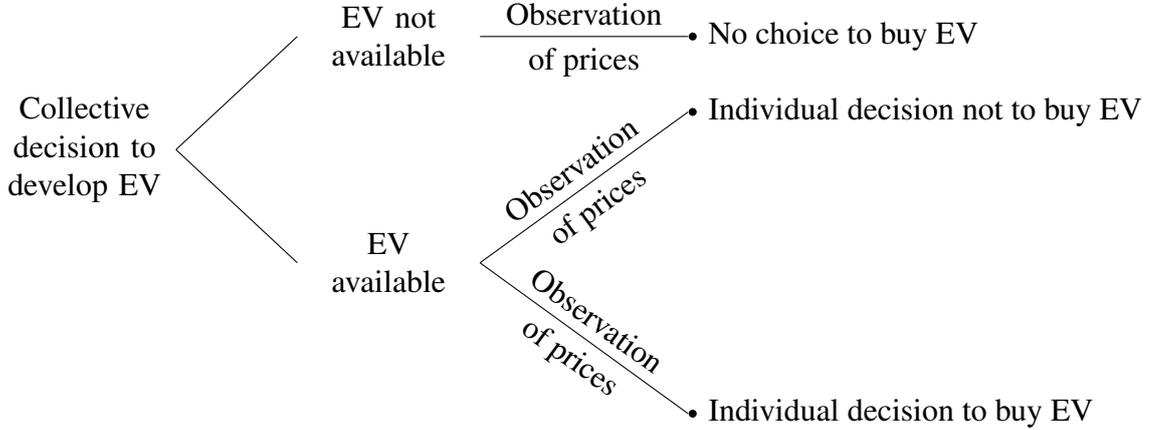


Figure 1: Decision tree for EV availability

2.2 Calculating the total cost of ownership of a vehicle

The TCO of cars as is the cost of owning and using a car for a given lifetime. Here we calculate a TCO for each year of this lifetime that we call Annualized Total Cost of Ownership (ATCO). It allows us to calculate the difference between the TCO per year for one given year (2020), avoiding us to make any scenario on the beliefs of the households on the energy prices evolution over the car lifetime (15 years) .

We consider three technologies : the classic car is the cheapest one but it consumes more fuel than the efficient one, which is more expensive. The electric car is the most expensive of the three technologies but consumes electricity and comparatively less energy than the two other ones.

We use the same energy prices as in the CGDD study (CGDD, 2011) (see Tab.2) to compute the ATCO (Eq. (1)) of three different technologies for a representative household who travels the French average distance : 12 800km with one car in a year (ENTD, 2008).

$$ATCO = \frac{C_{Inv}}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t}} + D \cdot (c_{fuel} \cdot p_{fuel} + c_{elec} \cdot p_{elec}) \quad (1)$$

C_{Inv} is the price of the vehicle, D is the annual distance traveled by the household, c_j is the consumption per kilometer for the fuel j and p_j the price of the fuel j , r is the discount rate and T the lifetime of the car.

Here we only study purchasing price and fuel cost, other elements could be taken into account to compute the ATCO (repair cost, insurance cost,...), but we assume that it is not different between technologies. We use this simplified form of ATCO to illustrate the impact of uncertainty on some parameters and heterogeneity of households.

We suppose the three technologies differ only in their price and their consumption. The classic car is the cheapest one but it consumes more fuel than the efficient one, which is more expensive. The electric car is the most expensive of the three technologies but consumes electricity and comparatively less energy than the two other ones (Tab.1). Consumption of the classic cars is set to the mean consumption of fuel in France in 2007 (MEEDDAT/SESP, 2008). Consumption of the efficient car is set to the mean consumption of the first ranked cars by the ADEME (ADEME, 2011). It corresponds to the A class of the CO₂ economy label in France (the cleanest cars in 2011). For the moment we suppose the electric car has the same autonomy than the two other technologies. Assumption on technologies prices and consumptions are shown in Table 1.

	Classic	Efficient	Electric
Cost (€)	16 000	22 000	29 000
Fuel consumption (L/100km)	6.8	4	0
Electricity consumption (kWh/100km)	0	0	20
Equivalent consumption (kWh/100km)	68	39.5	20

Table 1: Different types of vehicles characteristics

We use energy and carbon prices of CGDD for 2020 (CGDD, 2011), in order to compare to the their results : fuel price is 1.50€/l and electricity price is 0.14€/kWh in 2020. We suppose the carbon tax is 56€/tCO₂ in 2020 (Quinet et al., 2009). According to Doucette and McCulloch (2011) the carbon content of electricity used to refill electric cars in France in 2011 is 86 gCO₂/kWh (17 gCO₂/km). For simplicity, we suppose in the rest of the computations that this carbon content stays unchanged in the future (if we considered the carbon contents of electricity could decrease with the carbon tax, we would find a higher option value).

For the carbon content of fuel we compute a composite value for gasoline and diesel from the data of Observatoire de l'énergie et Caisse des dépôts (2007). Classic cars emit 170 gCO₂/km and efficient cars 95 gCO₂/km.

We choose the discount rate of Lebègue report : 4% (Lebègue, 2005) in order to be consistent with the CGDD study. This discount rate is supposed to be the public real discount rate, without risk option value. Here we are computing TCO

for private choices, this discount rate seems to be low. For this reason, we make sensitivity analysis on the discount rate parameter in the last section. The chosen parameters are shown in table 2.

	Description	Units	Value
D	Mean kilometers	km/yr	12 800
.	Standard deviation for kilometers	km/yr	9 800
T	Mean car lifetime	yr	15
r	Discount rate	.	4%
c_{carb}	Carbon content of fuel	gCO ₂ /l	2500
c_{elec}^{ref}	Carbon content of electricity	gCO ₂ /kWh	86
t	Mean carbon tax	eur/tCO ₂	56
p_{carb}	Mean fuel price in 2020	€/l	1.5
p_{elec}	Mean electricity price in 2020	€/kWh	0.14

Table 2: ATCO parameters

We find that in 2020, the classic car costs 2910 € annually, the efficient 2840 € and the electric car 2990 €. The electric car is more costly than the other technologies. This could lead to say that regarding the monetary cost of the car, EV development is not worth any investment today to make it available in 2020, as it will not be cost effective on average for the households.

However, if we look at the minimum fuel price required to make the electric vehicle competitive, we find that a 1.76 €/L fuel price in 2020 is enough to make the EV cheaper than the ICE. This price is not very high if we consider it is elaborated on uncertain future fuel prices and taxation.

2.3 Considering uncertainty and introducing heterogeneity

2.3.1 Uncertainties on fuel prices and carbon tax

If we take into account that the prices of energy are uncertain for 2020 (Energy Information Agency, 2013), the electric vehicle can become a hedge against the uncertainty on fuel and carbon prices. The value for this hedge relies on the assumption that if there is no investment, the electric vehicle cannot be available.

To compute the value of this hedge, we suppose the energy prices are log-normal distributed. This distribution a standard representation for uncertain prices (Wikipedia, 2015). For characterizing the distribution we define a mean and a relative standard deviation (RSD) which account for the uncertainty on the energy

prices.

$$RSD = \frac{\text{Standard Deviation}}{\text{Mean}} \quad (2)$$

We take the previous energy prices as the mean of the distribution (mean fuel price of 1.50€/L and an electricity price of 0.14€/kWh in 2020 before carbon tax). To take into account the uncertainty on the value of fuel prices, we chose a RSD of 20% , reflecting the differences in previsions for the future fuel prices (Energy Information Agency, 2013). The electricity price RSD is also 20%.

We assume the carbon tax is random and also follows a log-normal distribution with a mean of 56€ and a relative standard deviation of 50%. With the tax, the mean fuel price changes to 1.6€/L, mean electricity price and fuel and electricity RSD do not change significantly. This distribution is taken to reflect the wide uncertainties around carbon tax (Quinet et al., 2009). Propositions for 2010 carbon tax in France were around 15 euros, that is to say, half the amount of the proposition of the Quinet report (30 euros). If we consider existing carbon taxes in Europe, they vary between 114€/tCO₂ in Sweden and 15€/tCO₂ in Denmark in 2011. The carbon price in the EU-ETS has changed from around 30€/tCO₂ in 2008 to around 5€/tCO₂ today. Energy price and carbon tax distributions are sum up in table 3.

	Description	Units	Value
t	Mean carbon tax	eur/tCO ₂	56
RSD_t	RSD for carbon tax	.	50 %
p_{carb}	Mean fuel price in 2020	€/l	1.5
RSD_{carb}	RSD for fuel	.	20 %
p_{elec}	Mean electricity price in 2020	€/kWh	0.14
RSD_{elec}	RSD for electricity	.	20 %

Table 3: Energy price and carbon tax distributions parameters

First we suppose electric cars available in 2020 have the same autonomy than the two other technologies. Thus the value we compute here is the amount a households can pay for the hedge offered by an electric vehicle that gives at least the same mobility services than the ICE engine. Part of this amount could then be invested in the technology of batteries to overcome autonomy restrictions.

We compare two possible worlds, one with the electric car availability and one without. In both worlds, the household computes the ATCO of the available technologies and chooses the cheapest one. We use a Monte Carlo simulation. As

the prices of electricity, fuel and carbon are uncertain, the household makes this computation for each combination of prices. Then we compare the distributions and the difference in the mean cost in the two worlds to find the option value the household can pay.

2.3.2 Heterogeneity in households

Here we consider several households with heterogeneous annual distance traveled, some of them may be more interested than other in the electric vehicle and then have a higher interest in insure for the availability of this technology.

We consider a sample of heterogeneous households with different annual kilometers. For the annual kilometers of households, we use the French database of ENTND (ENTND, 2008). These kilometers correspond to the annual kilometers of one of the cars of the households randomly selected.

Then the option value can be written as follow :

$$OV = \sum_{n \in N} E(\min(ATCO_{class}^n, ATCO_{effi}^n)) - \sum_{n \in N} E(\min(ATCO_{class}^n, ATCO_{effi}^n, ATCO_{ev}^n)) \quad (3)$$

Where N is the number of households, $ATCO_{class}^n$ is the random variable associated to the annualized cost of ownership of a classic car for household n , same notation is used for the efficient car (*effi*) and the electric car (*ev*). E is the expected value.

With the same notation, option value can also be written as :

$$OV = \sum_{n \in N} E[\max\{0, (\min(ATCO_{class}^n, ATCO_{effi}^n) - ATCO_{ev}^n)\}] \quad (4)$$

Up to now, we considered the autonomy of the electric car was not a constraint. For the next calculation, using the data of ENTND, we forbid the choice of the electric car by households who drive more than 150km a day, which is today EVs mean autonomy (IEA, 2011). We suppose that only the cars that traveled less than 150km/day in the last month (duration of the ENTND study) can be electric ones.

2.3.3 Uncertainty on battery prices

The availability of electric car is not often considered as a hedge because of its uncertain cost. Batteries in 2020 could be very expensive or not (Catenacci et al., 2013). We introduce an uncertainty on the battery cost, that is on the electric car

cost. We assume the cost of electric cars follows a log-normal distribution around a mean of 29 000€ . Today batteries cost is around 10 000€ . We choose to set the standard deviation for battery cost at 5000€ to represent the possibility for battery to become half lower or half higher (Cambridge Econometrics and Ricardo-AEA, 2013; McKinsey&Company, 2010; Catenacci et al., 2013). This corresponds to a RSD of 17% on the electric car price. The distribution for EV prices is assumed log-normal, the car could be in rare cases far more expensive than today if we imagine for example greater autonomy but half the analyses it turns out to be cheaper.

3 Results

3.1 Uncertainties on fuel prices and carbon tax

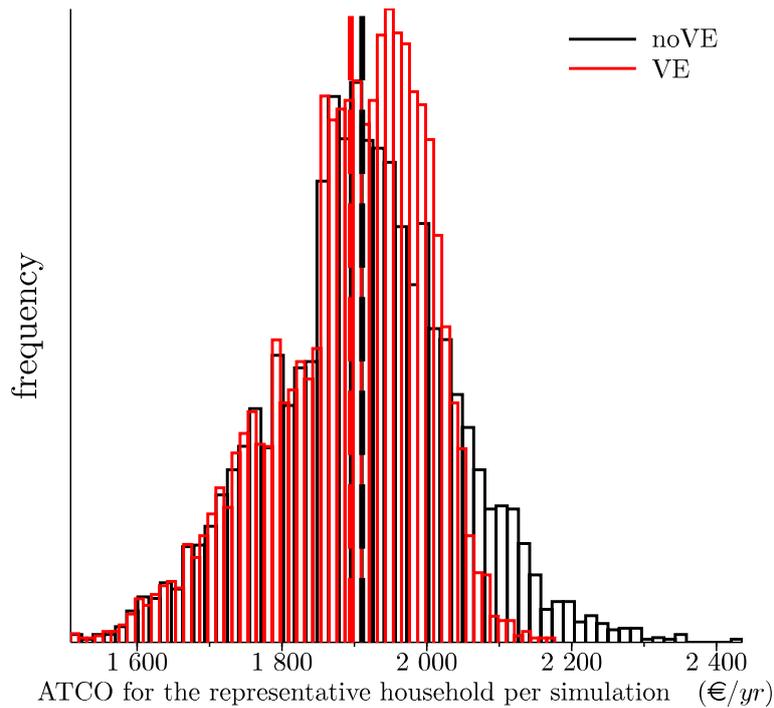


Figure 2: Distribution of discounted ATCO of the cheapest car for the representative household and different energy prices simulations in 2020

The representative household, when facing uncertainty on the energy prices, can hedge by keeping the possibility to buy an electric car in some cases. The

amount of the option value once discounted, is small : 20 €/hh/yr (this value and all the option values in this article are discounted to 2010). This value is represented in Fig. 2 by the difference between the mean ATCO (dashed line) of both distribution. The availability of the electric car avoids the higher ATCOs to the households. Indeed the distribution of the annual cost for the car the household chooses (Fig. 2) is slightly less spread on the right when the electric car is available in 2020.

3.2 Heterogeneous households in an uncertain framework

Once again, each household computes the Annual Total Cost of Ownership for each technology (ATCO) for its mobility needs (annual kilometers of one of their car) and chooses the cheapest one.

The average option value over all households is higher than in the previous section: 70 €/hh/yr (see Table 4).

For a lot of households (75%), the option value for the electric vehicle is 0, they are not interested by this vehicle. But the maximum option value (3250€) shows that the distribution of option values is spread on the right. For some households, the expected gain for the EV is high.

	Mean	Standard Deviation	Min	Max
option value (€)	70	165	0	3250

Table 4: option value for heterogeneous households over different energy prices simulations

Concerning the option value when the autonomy is limited, table 5 shows that the standard deviation is lower, the distribution is less spread. The share of households that are interested in electric vehicles changes from 25% to 15%. The households that were interested in the electric car because they had higher annual traveled kilometers are often the same that the ones that drive more than 150km at least one day per month.

	Mean	Standard Deviation	Min	Max
option value (€)	30	125	0	3250

Table 5: option value for heterogeneous households with a constraint on the autonomy of the electric car and different energy prices simulations

As expected, the discounted option value is lower than previously : 30 €/year.

Even when we take into account the limited range of the electric cars, there is a non-zero value for the availability of these cars.

3.3 When more uncertainty increases the risk option value

	Mean	Standard Deviation	Min	Max
option value (€)	110	170	0	3280

Table 6: option value for heterogeneous households, for uncertain car price and different energy prices simulations

Table 6 shows that the option value values are higher than previously. The uncertainty on the future EV price may appear as a reason for their option value to be lower. In fact, the households can hedge more on average than in the previous sections : 110 € /year. We have to keep in mind that the option of developing the EV sector brings the right but not the obligation of buying an EV. Then battery cost plays an asymmetric role on the option value as it can improve the cost-effectiveness of EV use more than it can worsen it (the option value cannot be negative).

Another explanation of this results comes from the distribution of the annual traveled kilometers. This distribution has a log-normal shape (concentrated around its average and with a long tail in the higher values). The average option value increases a lot in the situations where the car price is low because there are marginally more households interested in the EV. And, for each household, if in 2020 electric vehicle is available but more expensive than one of the other technologies, they will not buy EV and only loose the option value payed for availability. But if the EV is the cheapest, the availability worth the investment in the hedging as the EV become interesting. In the cases where the car price increases, the option value would be zero for some more households, but with the initial price, they were already a lot. So in average, the fact that the EV price could decrease brings a higher option value to its availability. The benefit in the possible cases when the price of the EV car is low, exceeds the loss in the cases the EV price is high.

4 Sensitivity analysis

We change the RSD of the energy prices in order to assess the influence of the level of uncertainty on the option value. As we could expect the option value rises with the uncertainty level (Fig.3 and Fig.4). Uncertainty on fuel prices affects more the

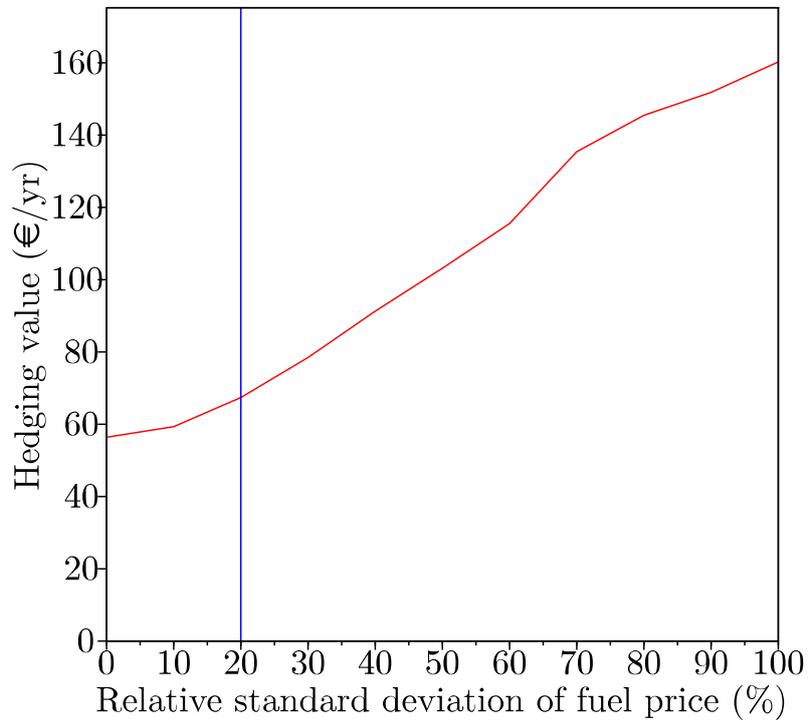


Figure 3: option value when the Relative Standard Deviation of the fuel prices changes. Vertical line is the initial parameter.

value for option value than the variations in electricity level of uncertainty because the electric vehicle does not consume lot of electricity.

Then we change the level of uncertainty on the car prices. We compute it for different levels of mean car price (Fig.5), in order to see if for some mean prices and level of uncertainty option value could be lower than in the previous sections. We vary the RSD of the car price between 0% and 50%, representing a standard deviation of 0€ to half the price of the car (10 000€ to 17 500€ depending on the mean car price we choose). The option value rises rapidly and becomes less sensitive to uncertainty on the battery cost when the mean car price decreases.

Up to now, the discount rate was set at 4% in order to compare with the CGDD analysis. But the discount rate is used here in the context of households choices for buying a car and 4% seems too low for households computation of discounted cost of cars. We compute option values for two other discount rates. Hausman (1979) computes an individual discount rate between 15% and 25% for the purchase of energy-using durables and Dreyfus and Viscusi (1995) between 11% and 17%. In this sensitivity analysis, the discount rate varies between 4% and 25%. Figure 6 shows that the option value decreases and approaches zero when the discount rate

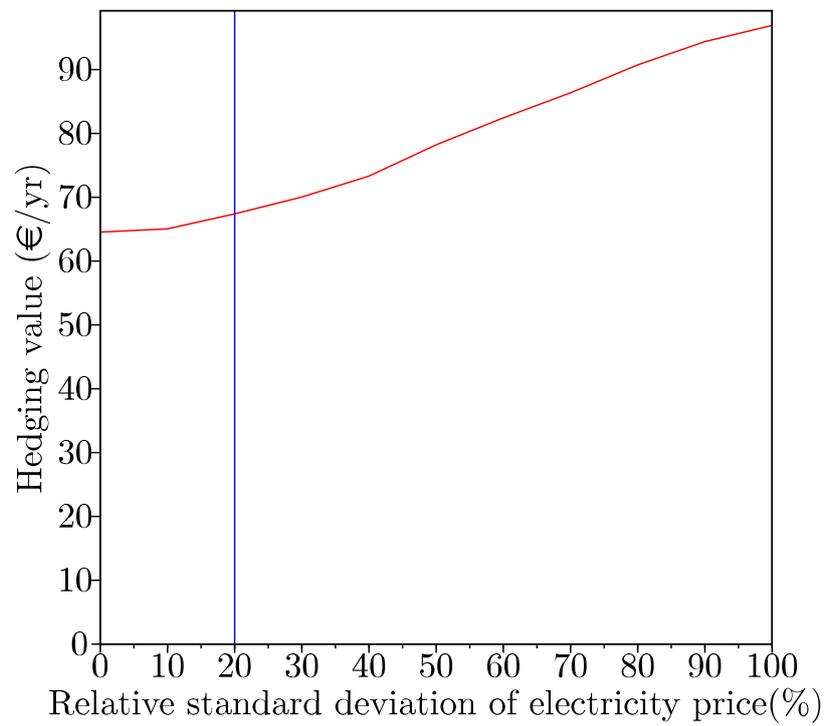


Figure 4: option value when the Relative Standard Deviation of the electricity prices changes. Vertical line is the initial parameter.

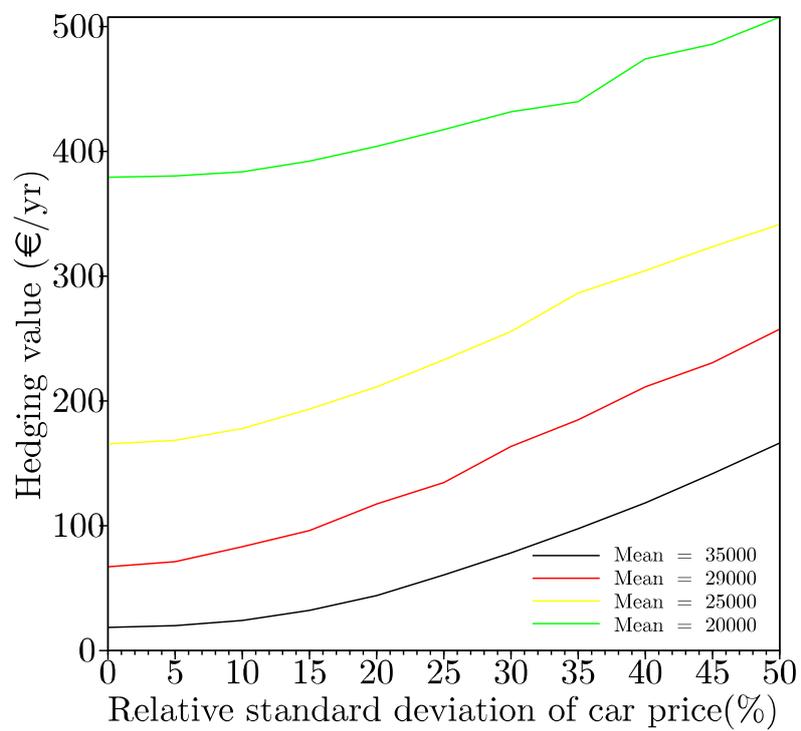


Figure 5: option value when the Relative Standard Deviation of the electric car price changes for different mean car price

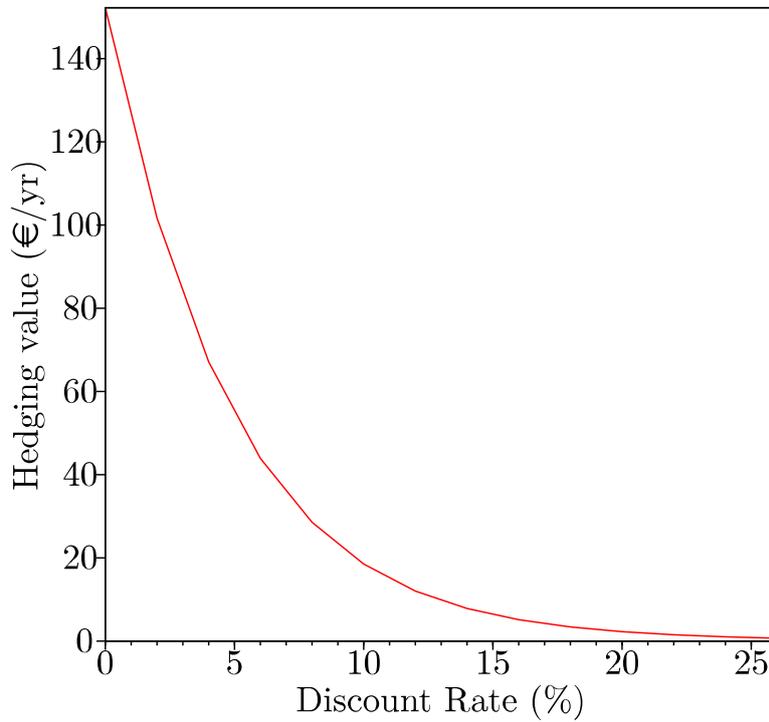


Figure 6: option value for different discount rates

increases. We can consider that with the initial assumptions on energy prices and above 25% of discount rate, the option value becomes zero.

5 Discussion and conclusion

In order to compute the option value amount of all driving households, we sum the average option value we computed for all French cars. We assume the number of cars will be the same in 2020 than today : 31 millions (MEEDDAT/SESP, 2008).

The total option value goes from around 90 million euros per year to around 340 million euros per year, respectively in the case when the autonomy is limited and in the case when the battery price is uncertain. In order to compute this value for the period between 2020 and 2030 (ten year of electric car availability), we choose to keep the uncertainty on energy prices constant over years. We could take into account the fact that the uncertainty on energy prices increases over these ten years. The option value would then raise with the date. The following option values are thus underestimated.

The total discounted option value for 2010 (with a 4% discount rate) for the ten

year period between 2020 and 2030 runs from around 1 billion euros to around 3 billion euros, respectively in the case when the autonomy is limited or in the case when the price is uncertain.

This amount represents the value for hedging against energy prices uncertainty by making electric cars available with certainty, for French households, discounted at 4% . This value is what drivers can collectively spend in the development of the technology.

Then the discussion that follows concerns the attribution of this amount. The question what can this amount be compared to, brings the following one : who collects this option value in order to make the EV available?

If we consider the investment should be public, we can compare the total option value value to the efforts done by the public sector. The publicly funded research for electric vehicle in France is actually around 150 million euros for the 2007-2015 period and the publicly funded demonstration projects in France for the same period represent around 100 million euros (Zubaryeva and Thiel, 2013). Our results thus suggest that the public spendings in France during the 2007-2015 period for the EV development is far lower than what households can buy to have the option of its availability during 10 years (1 to 3 billion against 250 million).

The collective investment could also be done by the private sector if, for example, car manufacturers assume EV availability will bring them further profits. But option values computed here would only be a part of total R&D spendings by car manufacturers and the automotive industry as it only considers the financial costs and benefits of the EVs development for the households and does not count for the firms potential gains.

This amount is computed from private choices. The total amount and the average are positive but individual option values are different for each households, and for a lot of households is zero even if in some extremely high future energy prices they could benefit from the EV availability. This brings us to the public good nature of electric vehicle availability, because the development of electric vehicles cannot be decided individually (the development of the technology need a collective investment). The non-excludability characteristic of electric vehicle availability could lead to free riders compartments: in fact no one would have the interest to pay for the option individually, if she could benefit from the availability of electric vehicle.

The total option value could also be compared to the external cost associated to conventional engines. The report Becker et al. (2013) computes these external cost for noise, CO₂ emissions and air pollutants. For France these costs are approximatively to 11 billions per year. These costs could be partly avoided with the EV availability.

To conclude, we computed positive option value for the electric vehicle when taking into account the uncertainties on energy prices (fuel and electricity) and

the heterogeneity of the traveled kilometers for French households. The results are summarized in 7.

Computation for...	option value
One average household and uncertainty on energy prices	20 €/yr/capita
Heterogeneous households and uncertainty on energy prices :	
- Unlimited EV autonomy	70 €/yr/capita
- 150 km of autonomy for EV	30 €/yr/capita
- Uncertainty on EV price	110 €/yr/capita
Aggregated values for one year	from 90 million to 340 million €/yr
Aggregated values between 2020 and 2030 (discounted in 2020)	from 1 billion to 3 billion €

Table 7: Computed option values for electric car availability for French households for 2020

This result is greater than zero for different levels of uncertainty, different prices of the EV and different discount rates below 25%. It means that the availability of electric vehicles in 2020 is interesting for enough households and future energy prices to make the average option value value positive.

Then the question is who should pay and invest in the development of this technology. As these option value values are computed for private choices, the investments should be individual.

There is a positive value for hedging with electric vehicles availability at an aggregated level, now the question raised is how to capture and use it.

6 Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the IMD (Institut de la Mobilité Durable from Renault and ParisTech) for this research. We thank Minh Ha-Duong for useful discussions.

References

- ADEME, 2011. Consommations conventionnelles de carburant et émissions de CO₂.
- Arrow, K. J., Fisher, A. C., May 1974. Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility. *The Quarterly Journal of Economics* 88 (2), 312–319.
- Audoly, R., Vogt-Schilb, A., Guivarch, C., 2014. Pathways toward zero-carbon electricity required for climate stabilization. *World Bank Policy Research Working Paper (7075)*.
- Becker, U. J., Becker, T., Gerlach, J., 2013. The true costs of automobility: External costs of cars overview on existing estimates in eu-27.
- Bosetti, V., Longden, T., 2013. Light duty vehicle transportation and global climate policy: The importance of electric drive vehicles. *Energy Policy* 58 (0), 209 – 219.
- Bunch, D. S., Bradley, M., Golob, T. F., Kitamura, R., Occhiuzzo, G. P., 1993. Demand for clean-fuel vehicles in california: A discrete-choice stated preference pilot project. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 27 (3), 237 – 253, special Issue Energy and Global Climate Change.
- Cambridge Econometrics, Ricardo-AEA, 2013. An economic assessment of low carbon vehicles.
- Catenacci, M., Verdolini, E., Bosetti, V., Fiorese, G., Oct. 2013. Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy* 61, 403–413.
- CGDD, May 2011. Les véhicules électriques en perspectives, analyse coûts-avantages et demande potentielle. Tech. rep.
- Cicchetti, C. J., Freeman III, A. M., 1971. Option demand and consumer surplus: Further comment. *The Quarterly Journal of Economics* 85 (3), 528–539.
- Crist, P., 2012. Electric vehicles revisited: costs, subsidies and prospects. *International Transport Forum Discussion Paper*.
- Dixit, A. K., Pindyck, R. S., Jan. 1994. *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.

- Doucette, R. T., McCulloch, M. D., 2011. Modeling the CO₂ emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. *Energy Policy* 39 (2), 803–811.
- Dreyfus, M. K., Viscusi, W. K., 1995. Rates of time preference and consumer valuations of automobile safety and fuel efficiency. *Journal of Law and Economics* 38 (1), pp. 79–105.
- Energy Information Agency, 2013. Annual energy outlook 2013. Tech. rep.
- ENTD, 2008. Enquête nationale transport et déplacements. Tech. rep., Ministère des transports, INSEE.
- Ewing, G. O., Sarigöllü, E., 1998. Car fuel-type choice under travel demand management and economic incentives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 3 (6), 429 – 444.
- García, I., Miguel, L. J., 2012. Is the electric vehicle an attractive option for customers? *Energies* 5 (1), 71–91.
- Greene, D. L., Park, S., Liu, C., 2014. Analyzing the transition to electric drive vehicles in the u.s. *Futures* 58 (0), 34 – 52, sI: Low Carbon Futures.
- Ha-Duong, M., 1998. Quasi-option value and climate policy choices. *Energy Economics* 20 (5), 599–620.
- Hanemann, W., Jan. 1989. Information and the concept of option value. *Journal of Environmental Economics and Management* 16 (1), 23–37.
- Hausman, J. A., Apr. 1979. Individual discount rates and the purchase and utilization of Energy-Using durables. *The Bell Journal of Economics* 10 (1), 33–54.
- Hawkins, T. R., Gausen, O. M., Strømman, A. H., Sep. 2012. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (8), 997–1014.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H., 2013. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology* 17 (1), 53–64.
- Henry, C., Jan. 1974. Option values in the economics of irreplaceable assets. *The Review of Economic Studies* 41, 89–104.
- IEA, 2011. Technology roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Tech. Rep.

- Lebègue, 2005. Révision du taux d'actualisation des investissements publics. Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue.
- Lemoine, D. M., 2010. Valuing plug-in hybrid electric vehicles' battery capacity using a real options framework. *Energy Journal* 31 (2), 113.
- McCollum, D., Krey, V., Kolp, P., Nagai, Y., Riahi, K., 2014. Transport electrification: A key element for energy system transformation and climate stabilization. *Climatic change* 123 (3-4), 651–664.
- McKinsey&Company, 2010. A portfolio of powertrains for europe a fact-based analysis. Tech. rep.
- MEEDDAT/SESP, 2008. Le bilan de la circulation, les comptes des transports en 2007 (tome 1). Tech. rep.
- Observatoire de l'énergie et Caisse des dépôts, 2007. Les chiffres clefs : CO2 et énergie - france et monde.
- Propfe, B., Redelbach, M., Santini, D. J., Friedrich, H., 2020. Cost analysis of plug-in hybrid electric vehicles including maintenance & repair costs and resale values. In: *Proceedings of Electric Vehicle Symposium*. Vol. 26.
- Prud'homme, R., Koning, M., 2012. Electric vehicles: A tentative economic and environmental evaluation. *Transport Policy* 23 (0), 60 – 69.
- Quinet, A., Baumstark, L., Célestin-Urbain, J., Pouliquen, H., Auverlot, D., Raynard, C., 2009. La valeur tutélaire du carbone. centre d'Analyse stratégique, 16-2009. Tech. rep.
- Ramjerdi, F., Fearnley, N., 2013. Risk and irreversibility of transport interventions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* (0), –.
- Rozenberg, J., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Sassi, O., Guivarch, C., Waisman, H., Hourcade, J., 2010. Climate policies as a hedge against the uncertainty on future oil supply. *Climatic Change* 101 (3), 663–668.
- Schmalensee, R., Dec. 1972. Option demand and consumer's surplus: Valuing price changes under uncertainty. *The American Economic Review* 62 (5), 813–824.
- Schock, R. N., Fulkerson, W., Brown, M. L., San Martin, R. L., Greene, D. L., Edmonds, J., 1999. How much is energy research and development worth as insurance? *Annual Review of Energy and the Environment* 24 (1), 487–512.

- Sioshansi, R., Denholm, P., 2009. Emissions impacts and benefits of plug-in hybrid electric vehicles and vehicle-to-grid services. *Environmental science & technology* 43 (4), 1199–1204.
- Thiel, C., Perujo, A., Mercier, A., Nov. 2010. Cost and CO2 aspects of future vehicle options in europe under new energy policy scenarios. *Energy Policy* 38 (11), 7142–7151.
- Traeger, C., 2013. What's the Option? CUDARE Working Papers.
- Tran, M., Banister, D., Bishop, J. D. K., McCulloch, M. D., May 2012. Realizing the electric-vehicle revolution. *Nature Clim. Change* 2 (5), 328–333.
- van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., van den Broek, M., Faaij, A., Feb. 2011. Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources* 196 (4), 2298–2310.
- Weisbrod, B. A., 1964. Collective-Consumption services of Individual-Consumption goods. *The Quarterly Journal of Economics* 78 (3), 471–477.
- Wikipedia, 2015. Log-normal distribution — wikipedia, the free encyclopedia.
- Williams, J. H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow, W. R., Price, S., Torn, M. S., 2012. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: The pivotal role of electricity. *Science* 335 (6064), 53–59.
- Windisch, E., 2011. The potential for privately owned electric cars in the paris region: a disaggregate approach. In: *European Electric Vehicle Congress (EEVC)*. p. 26–28.
- Wu, G., Inderbitzin, A., Bening, C., May 2015. Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments. *Energy Policy* 80, 196–214.
- Zubaryeva, A., Thiel, C., 2013. Paving the way to electrified road transport. JRC Scientific and policy report.